



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## VÝUKOVÝ PŘÍPRAVEK S NAPÁJECÍMI ZDROJI

EDUCATIONAL TOOL WITH POWER SUPPLIES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Veronika Junasová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Studentka:** Veronika Junasová

**ID:** 199982

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Výukový přípravek s napájecími zdroji

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte laboratorní výukovou desku tvořenou několika dostupnými napájecími zdroji na malé napětí. Budou zde zastoupeny: lineární zdroj, spínané zdroje a nábojová pumpa. Spínané zdroje budou realizovány zvyšujícím a snižujícím měničem. Vybraným zdrojům bude umožněno variabilní nastavení důležitých parametrů, měření vybraných veličin a také zobrazení průběhů na osciloskopu. Součástí laboratorního přípravku bude variabilní zátěž, nastavitelný vyhlazovací filtr, měření teploty pomocí snímačů, měření napětí a proudu v zátěži. Tento přípravek bude sloužit pro výuku a názornou praktickou ukázkou v oblasti napájecích zdrojů, a také bude umožňovat ověření závislosti výstupních veličin na nastavení obvodových parametrů.

Zařízení navrhněte, realizujte a otestujte, přičemž všechny uvedené kroky detailně popište v textové části bakalářské práce. Navrhněte rovněž zadání laboratorních měření na vybraných zdrojích.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Táto práca sa zameriava na návrh a realizáciu prípravku s viacerými napájacími zdrojmi, a to lineárnym stabilizátorom, spínaným zdrojom bez indukčnosti, spínaným zdrojom s indukčnosťou v zapojení zvyšujúceho a znižujúceho meniča. Prípravok umožňuje výber medzi rôznymi hodnotami výstupného napätia, voľbu vstupných, výstupných filtrov, voľbu záťaže a meranie teploty jednotlivých zdrojov. Môže byť použitý na výuku alebo praktickú ukážku základných vlastností, výhod a nevýhod použitých napäťových zdrojov. Súčasťou práce je popis napájacích zdrojov na malé napätia, návrh laboratórneho prípravku a ukážku výstupov po jeho realizácii.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Napájacie zdroje, lineárny zdroj, spínaný zdroj, zvyšujúci menič, znižujúci menič, nábojová pumpa.

## **ABSTRACT**

This work deals with design and realization of board with numerous power supplies. It includes linear power supply, switching supply without inductor, switching supply with inductor using step-up and step-down converter. The board allows to choose between various output voltages, several input filters, output filters, loads and it enables to measure the temperature of used power supplies. It can be used for education and practical demonstration of basic properties, advantages and disadvantages of these supplies. Part of the thesis is a description of power supplies for low voltages, design of educational board and demonstration of results.

## **KEYWORDS**

Power supplies, linear power supply, switched power supply, step-up converter, step-down converter, charge pump.

JUNASOVÁ, Veronika. *Výukový přípravek s napájecími zdroji*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2020. 61 s., 6 s. příloh. Bakalářská práce. Vedúci práce: Ing. Vladimír Levek, Pd.D.

## Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko študenta:** *Veronika Junasová*

**VUT ID študenta:** *199982*

**Typ práce:** *Bakalárska práca*

**Akademický rok:** *2019/20*

**Téma záverečnej práce:** *Výukový prípravok s napájacími zdrojmi*

*Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracovala samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce. Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušila autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahla nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomá následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Zb.*

V Brne dňa: **8. júna 2020**

.....  
Podpis autora

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Vladimírovi Levkovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

# OBSAH

Úvod.....	1
<b>1. Napájacie zdroje.....</b>	<b>2</b>
1.1 Lineárne napájacie zdroje .....	2
1.1.1 Lineárne stabilizátory napätia.....	3
1.1.2 Nízkoúbytkové stabilizátory – LDO .....	5
1.2 Spínané napájacie zdroje .....	6
1.2.1 Meniče bez indukčnosti .....	8
1.2.2 Meniče s indukčnosťou .....	9
1.2.3 Porovnanie meničov s indukčnosťou a bez indukčnosti .....	12
1.3 Rozdiely spínaných a lineárnych napájacích zdrojov .....	12
1.4 Filtrácia signálov.....	13
<b>2. Návrh prípravku .....</b>	<b>16</b>
2.1 Zdrojová časť prípravku .....	17
2.1.1 Usmernenie vstupu .....	17
2.1.2 Vyhľadzovacie filtre .....	18
2.1.3 Výstup na osciloskop.....	18
2.1.4 Zdroj s LDO .....	19
2.1.5 Indukčný menič <i>boost</i> .....	22
2.1.6 Indukčný menič <i>buck</i> .....	24
2.1.7 Nábojová pumpa.....	26
2.1.8 Výstupné filtre .....	27
2.1.9 Zátáže napájacích zdrojov.....	28
2.2 Riadiaca časť prípravku .....	30
2.2.1 MCU a jeho napájanie .....	30
2.2.2 Meranie teploty.....	32
2.2.3 Spínanie zdrojov a zátáže.....	33
2.2.4 Užívateľské rozhranie.....	34
<b>3. Realizácia a oživenie prípravku.....</b>	<b>36</b>
3.1 Realizácia a výroba DPS.....	36
3.2 Oživenie a testovanie prípravku .....	37
3.2.1 Oživenie LDO .....	37
3.2.2 Oživenie indukčného meniča <i>boost</i> .....	40
3.2.3 Oživenie indukčného meniča <i>buck</i> .....	42
3.2.4 Oživenie nábojovej pumpy.....	44
3.3 Programové vybavenie .....	46

<b>4. Návrh laboratórnej úlohy .....</b>	<b>50</b>
<b>Záver.....</b>	<b>51</b>
<b>Zoznam literatúry .....</b>	<b>53</b>
<b>Zoznam použitých skratiek .....</b>	<b>55</b>
<b>Zoznam použitých symbolov .....</b>	<b>56</b>
<b>Zoznam obrázkov.....</b>	<b>59</b>
<b>Zoznam tabuliek.....</b>	<b>61</b>
<b>A Schémy prípravku.....</b>	<b>62</b>
A.1 Schéma zapojenia napájania a zdrojov .....	62
A.2 Schéma zapojenia filtrov a záťaže .....	63
A.3 Schéma riadiacej časti.....	64
<b>B Doska plošných spojov .....</b>	<b>65</b>
B.1 Motív DPS z hornej strany ( <i>top</i> ).....	65
B.2 Motív DPS zo spodnej strany ( <i>bottom</i> ).....	66
B.3 Servisná potlač z hornej strany ( <i>top</i> ) DPS .....	67



# ÚVOD

Napájacie zdroje sú súčasťou všetkých elektronických zariadení, ktoré sú používané v každodennom živote. V rámci obvodu sa bežne vyskytujú rozličné požadované napätia, vplyvom čoho sa na jednom prípravku nachádza aj viacero zdrojov v podobe stabilizátorov alebo rôznych meničov. Návrhár obvodov preto musí poznať aspoň ich základné princípy, ich vlastnosti, výhody, nevýhody a využitie. Ide o veľmi širokú oblasť, ktorú nie je možné podrobne prebrať v rámci vyučovania a skúsenosti s ich návrhom človek nadobúda časom a praxou.

V programe mikroelektronika a technológie však chýba predmet, v ktorom by sa so zdrojmi študenti stretli inak ako zo stránok skript alebo prezentácií. Pri praktickej práci s vhodným výukovým prostriedkom by si iste odniesli nápomocné poznatky a mohli si popri tom bezpečne odskúšať klady a zápory jednotlivých zdrojov. Práve táto skutočnosť bola podkladom pre spracovanie tejto práce, ktorá si kladie za úlohu vytvoriť prehľadný a funkčný prípravok s odlišnými druhmi zdrojov.

Z pohľadu študenta, ktorý sa s predstavovanými zdrojmi nestretol, bude možné navrhnuť koncept prípravku tak, aby si aj problematiky zdrojov neznali študenti odniesli čo možno najviac poznatkov. Takáto úloha by sa dala docieľiť tak, že užívateľ bude môcť meniť odlišné parametre obvodov a pritom sledovať ako na zmeny reagujú rôzne zdroje. Väčšie množstvo menených parametrov by malo teoreticky rozšíriť množstvo zistení o danom zdroji.

So zdrojmi a signálmi nimi dodávanými neoddeliteľne súvisia filtre, ktoré dokážu priebehy signálov vylepšiť a prispieť tak k lepším vlastnostiam zdrojov. Naopak nevhodne zvolený filter môže spôsobiť viac škody ako úžitku, preto je potrebné oboznámiť študentov aj s vplyvmi odlišných filtrov na výstup.

V prvej kapitole práce je prebraná problematika zdrojov, ich rozdelenia so zameraním na lineárne stabilizátory, na spínané DC-DC meniče s indukčnosťou a bez indukčnosti. Zároveň sa tu nachádza časť zaoberajúca sa filtráciou signálov. Druhá kapitola je venovaná praktickej časti návrhu výukového prípravku. Nachádza sa tu popis návrhu všetkých blokov prípravku s podrobnými výpočtami. Tretia kapitola obsahuje spísanú realizáciu dosky plošných spojov a jej oživenie. Na koniec práce je navrhnutá laboratórna úloha s využitím navrhnutého prípravku.

# 1. NAPÁJACIE ZDROJE

Napájacie zdroje sú zariadenia schopné dodávať elektrickú energiu do elektrickej záťaže a zabezpečiť tak jej činnosť. Energia môže byť získavaná zo siete alebo z iných zdrojov energie, kedy sa využíva jej premena z rôznych foriem, napríklad solárnej, chemickej, mechanickej na elektrickú. Získanú elektrickú energiu je potrebné ďalej spracovať a upraviť. Podľa jej výslednej podoby sa rozlišujú rôzne druhy elektrických napájacích zdrojov. Rozlišujú sa podľa typu a veľkosti dodávaného výkonu, regulovateľnosti, a použitia.

Napájacie zdroje využívajú pre svoju činnosť rôzne spôsoby regulácie, podľa ktorých sa rozlišujú ich druhy. Ide o napájacie zdroje [1]:

- lineárne zdroje,
- spínané zdroje s impulznou šírkovou moduláciou PWM (z ang. *Pulse Width Modulation*),
- rezonančné spínané zdroje.

Pozornosť bude ďalej venovaná lineárnym zdrojom a spínaným zdrojom s PWM.

## 1.1 Lineárne napájacie zdroje

Lineárne napájacie zdroje pracujú iba so spojitými signálmi. Ich bloková schéma je znázornená na obrázku 1. Využívajú striedavý signál zo siete, ktorý je transformátorom zmenšený na vhodnú hodnotu a následne usmernený na jednosmerný signál. Ako usmerňovač sa najčastejšie využíva Graetzov mostík, ktorý na výstup dodáva absolútnu hodnotu vstupného napätia a prúdu. Takýto signál má jednosmerný ale pulzujúci priebeh, preto nie je vhodné jeho použitie pre napájanie a musí byť ďalej upravovaný. Iným spôsobom usmernenia môže byť využitie jednocestného usmerňovača, čo je dióda zapojená v priepustnom smere, ktorá prepustí iba kladné polovlny. V zdrojoch sa neuplatňuje, pretože oproti mostíkovému zapojeniu má výstupné napätie nepriaznivý tvar – výstup je ešte výraznejšie pulzujúci [2].

Usmernený pulzujúci signál je potrebné upraviť do požadovaného tvaru, na čo slúžia filtre. Na toto vyhladenie sa uplatňuje filter typu dolná priepusť s funkciou eliminovať prvú harmonickú zložku a zmierniť tak pulzovanie signálu. Môže ísť o integračný článok LC v obvodoch s väčšími prúdmi, respektíve RC v nízkovýkonových obvodoch, kde je možné navrhnuť odpor tak, aby na ňom bol menší úbytok napätia. Často sa využíva iba paralelne zapojený kondenzátor s dostatočne veľkou hodnotou kapacity tvoriaci s odporom transformátoru a diód usmerňovača integračný článok [3].



Obrázok 1 Bloková schéma lineárneho napájacieho zdroja, prebraná z [4]

Na výstupe lineárneho napájacieho zdroja je nutné nastaviť stabilné a konštantné napätie aj pri zmenách vstupného napätia, zaťažovacieho prúdu alebo teploty okolia,

čo zabezpečujú stabilizátory. Ide o elektrické obvody schopné automaticky vyrovnávať napäťové zmeny na záťaži. Rozlišujú sa stabilizátory [5]:

- parametrické,
- spätnoväzobné,
- integrované.

Parametrické stabilizátory využívajú na zaistenie stability výstupu vhodné priebehy voltampérových charakteristík niektorých nelineárnych prvkov, ako sú napríklad Zenerove diódy, usmerňovacie diódy alebo tlejivky. Stabilizujú napätie, ak je v pracovnom bode menší dynamický odpor ako jednosmerný. Ak je dynamický odpor naopak väčší, jedná sa o parametrické stabilizátory prúdu [6].

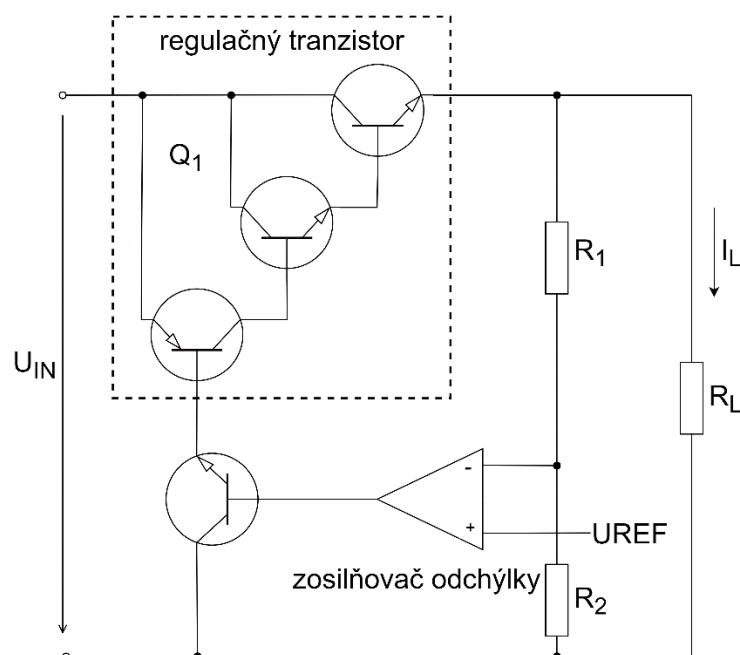
V spätnoväzobných stabilizátoroch sa uplatňuje regulačný prvok porovnávajúci napätie na výstupe s referenčným napätím, na základe čoho upravuje výstup. Ako regulačná súčiastka sa zvyčajne využíva tranzistor zapojený sériovo so záťažou, ktorý sa chová ako premenlivá záťaž prispôsobujúca svoj dynamický odpor podľa odchýlky.

Integrované stabilizátory sú spätnoväzobné stabilizátory zvyčajne zapuzdrené do podoby integrovaného obvodu s minimálne tromi vývodmi. Mávajú v sebe zahrnutú prúdovú ochranu a sú odolné proti skratu. Podľa výkonu na ktorý sú určené môžu mať možnosť pripevnenia na chladič. Pre ich činnosť k nim zvyčajne stačí pripojiť niekoľko pasívnych súčiastok podľa odporúčaní výrobcu, preto je ich použitie jednoduché a rýchle. Na trhu je dostupné široké množstvo takýchto lineárnych stabilizátorov s rôznymi parametrami pre potreby užívateľov.

### 1.1.1 Lineárne stabilizátory napätia

Spätnoväzobné riadenie napätia na výstupe využívajú lineárne stabilizátory napätia. Princíp ich fungovania znázorňuje schéma na obrázku 2. Na výstupe obvodu sa sníma napätie a je porovnávané s referenčným napätím zosilňovačom odchýlky (z ang. *Error Amplifier*). Ten rozdiel napätí zosilní, čím riadi regulačný tranzistor zapojený sériovo so záťažou. Regulačný tranzistor funguje ako zdroj prúdu, pomocou ktorého sa nastavuje požadované výstupné napätie. Môžu sa využívať bipolárne tranzistory, bipolárne tranzistory v Darlingtonovom zapojení alebo unipolárne tranzistory.

Na regulačnom prvku vzniká prechodom prúdu úbytok napätia  $U_{DO}$  (z ang. *Drop-out Voltage*), voľne preložitelný ako stratové napätie. Ide o minimálnu hodnotu napätia medzi vstupom a výstupom nutnú pre zabezpečenie správnej funkcie regulátoru. Z tohto vyplýva, že lineárne stabilizátory sú vždy znižujúce konvertory napätia a je teda nutné na vstup privádzať napätie aspoň o  $U_{DO}$  väčšie ako je požadované napätie na výstupe. U bežných lineárnych stabilizátorov sa pohybuje rádovo v jednotkách voltov, čo predstavuje problém v prípadoch, kedy je rozdiel vstupného a výstupného napätia menší ako toto napätie. Typickým príkladom takejto situácie je procesor pracujúci s 3,3V napätím, pričom je k dispozícii 5 V.



Obrázok 2 Schematický diagram bežného lineárneho regulátoru, prebrané z [7]

Stratové napätie je dané použitými regulačnými tranzistormi, mení sa s teplotou, odoberaným prúdom do záťaže a nastaveným vstupným napätím. Darlingtonovo zapojenie, ktoré je vidieť na obrázku 2, bude mať úbytok regulačnom prvku väčší ako pri použití jedného tranzistoru. Stratové napätie na ňom sa pohybuje v rozmedzí od 2,5 V do 3 V, kým pri použití jedného tranzistoru býva maximálne 0,8 V [7].

Výhodou týchto stabilizátorov je ich jednoduchosť, kedy stačí pridať minimum ďalších pasívnych súčiastok, nízka cena a široký výber rôznych typov. Majú rýchlu odozvu na zmenu vstupného napätia a napätia na výstupe. Výsledný signál je minimálne zašumený vďaka tomu, že sa v obvode nevyužívajú vysoké frekvencie a spínanie [8].

Významnou nevýhodou býva úbytok napätia na regulačnom tranzistore, ktorý spôsobuje, že výkon, ktorý nejde do záťaže, sa premieňa na teplo [1]. Vplyvom tohto sa súčiastka zahrieva a zhoršujú sa jej vlastnosti, je preto nutné používať vhodný chladič alebo dostatočnú medenú vrstvu, a pri voľbe konkrétneho typu brať do úvahy zmenu výstupných parametrov pri zvýšenej teplote. Nutnosť chladiča zvyšuje náklady na výrobu zariadenia a aj jeho hmotnosť.

Využitie lineárnych stabilizátorov je v lineárnych zdrojoch. Často sa však zaradzujú ako posledný stupeň zdrojov, najmä spínaných, s veľkým šumom, kedy už nie je kladený dôraz na účinnosť premeny napätia ale na vyhladenie rušenia spôsobeného spínaním. Dôležitý je tu činiteľ potlačenia zvlnenia napájacieho zdroja PSRR (z ang. *Power Supply Ripple Rejection*), ktorý popisuje zmenšenie zvlnenia výstupu vzhľadom na vstup [9].

Lineárne stabilizátory sú dostupné v rôznych prevedeniach, môžu mať pevné výstupné napätie alebo nastaviteľné pomocou rezistorového deliča, niektoré sú schopné regulovať záporné napätia. Často využívaných druhom lineárnych stabilizátorov napätia sú nízkoúbytkové stabilizátory LDO (z ang. *Low Dropout Regulator*).

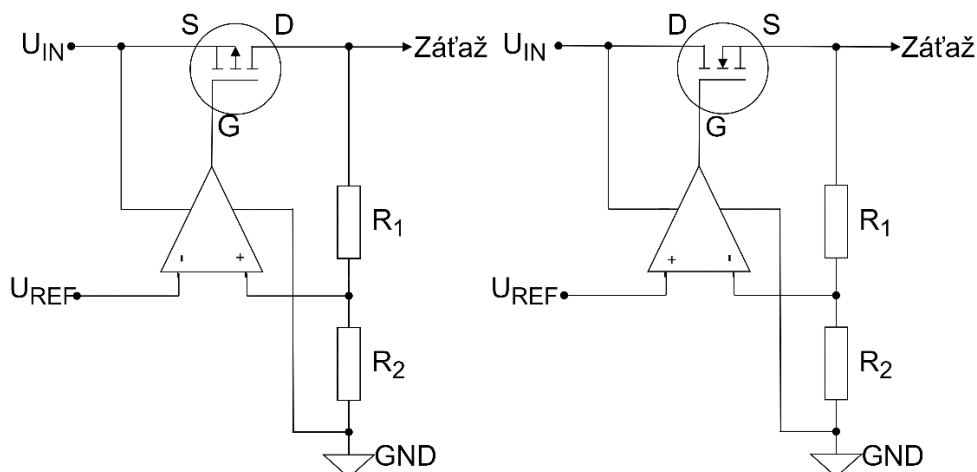
### 1.1.2 Nízkoúbytkové stabilizátory – LDO

Ak nie je možné aby bolo vstupné napätie dostatočne veľké na zaistenie požadovaného výstupného napätia, využívajú sa LDO – lineárne regulátory s nízkou hodnotou stratového napätia, ktoré rádovo predstavuje desatiny voltov. V LDO sa ako regulačný prvok využíva jeden tranzistor. V prípade použitia bipolárneho tranzistoru býva stratové napätie maximálne 0,7 V – 0,8 V pri maximálnom zaťažovacom prúde, bežne však dosahuje hodnotu 0,6 V. Veľkosť stratového napätia je ovplyvnená veľkosťou odoberaného zaťažovacieho prúdu a nastaveného vstupného napätia. Ak bude zaťažovací prúd malý, môže byť malý aj úbytok napätia na tranzistore a s ním stratové napätie [7].

V LDO sa však častejšie používajú unipolárne tranzistory NMOS (z ang. *N-channel Metal Oxid Semiconductor*) a PMOS (z ang. *P-channel Metal Oxid Semiconductor*), pretože úbytok na nich môže byť výrazne menší a závisí na veľkosti vstupného napätia. Zosilňovač odchýlky v oboch prípadoch porovnáva referenčné napätie s napätím na výstupe cez delič a ich rozdiel zosilňuje, čím riadi odpor  $R_{DS}$  (medzi vývodmi *drain* a *source*), tak, že mení napätie  $U_{GS}$  (medzi vývodmi *gate* a *source*). Stratové napätie je:

$$U_{GS} = R_{DS} \cdot I_z [V], \quad (1)$$

kde  $I_z$  je prúd záťaže. Zo vzťahu je vidieť, že stratové napätie závisí na odpore  $R_{DS}$ , a teda aj na hodnote vstupného napätia, s ktorou sa tento odpor mení [10]. Zapojenie PMOS, respektíve NMOS tranzistoru je vidieť na obrázku 3 a), respektíve 3 b).



Obrázok 3 a) PMOS LDO b) NMOS LDO, prevzaté z [10]

Keď sa napätie na vstupe približuje k požadovanej hodnote napätia na výstupe, zosilňovač odchýlky v PMOS LDO nastavuje  $U_{GS}$  do zápornejších hodnôt, čím sa tranzistor otvára a znižuje sa  $R_{DS}$ . Minimálna hodnota tohto odporu pri danom vstupnom napätí nastane v momente saturácie zosilňovača, kedy už nebude možné nastaviť  $U_{GS}$  do zápornejších hodnôt. Ešte zápornejšie hodnoty je možné dosiahnuť zvýšením vstupného napätia, z čoho vyplýva, že pri vyššom výstupnom napätí sa dosiahne menšie stratové napätie, pretože so zápornejším  $U_{GS}$  klesá odpor  $R_{DS}$ .

V NMOS LDO zosilňovač zvyšuje napätie  $U_{GS}$ , aby sa znížil odpor  $R_{DS}$ , tranzistor sa otvoril a na výstupe bolo nastavené požadované napätie aj pri jemu blízkej hodnote vstupného napätia. Keď sa zosilňovač dostane do saturácie napätie  $U_{GS}$  už nejde viac zvýšiť a je nastavená minimálna hodnota odporu  $R_{DS}$ . Ak sa zníži vstupné napätie, zníži sa aj napätie  $U_{GS}$  a tým sa zväčší odpor  $R_{DS}$ .

## 1.2 Spínané napájacie zdroje

Spínané zdroje pracujú so spojitými aj impulznými (nespojitými) signálmi. Regulačný prvok spínaných zdrojov pracuje v dvoch stavoch, a to že regulačný tranzistor je buď rozopnutý, alebo zopnutý (v saturácii). K spotrebe energie dochádza iba pri nábehu do týchto stavov, čo vedie k značnému zvýšeniu účinnosti zdrojov, ktorá je ich hlavnou výhodou.

Podľa frekvencie s ktorou pracujú sa rozlišujú na [11]:

- spínané zdroje s frekvenciou siete,
- spínané zdroje s frekvenciou vyššou než je frekvencia siete.

Spínané zdroje s frekvenciou siete využívajú vo svojom obvode tyristory a triaky. Ide o starší druh spínaných zdrojov, ktorý kvôli frekvencii s ktorou pracuje, nedosahuje také dobré vlastnosti ako spínané zdroje s vyššou frekvenciou ako 50 Hz. Tento typ spínaných zdrojov sa vyskytuje už iba zriedkavo, a to v menej náročných aplikáciách. Je to podmienené súčasnou technológiou umožňujúcou jednoduché riadenie vysokofrekvenčných zdrojov, ktorej cena je nižšia a zaberá menšiu plochu.

Spínané zdroje s frekvenciou vyššou ako je frekvencia siete sa označujú ako impulzné zdroje, pretože využívajú impulznú reguláciu na riadenie regulačného tranzistoru, ktorý môže nadobudnúť dva stavy, a to rozopnutý a zopnutý. Vo svojom zapojení využívajú rýchle polovodičové súčiastky, výkonové regulačné prvky, feritové jadrá a malé kondenzátory s veľkou hodnotou kapacity, ktoré umožňujú prácu na omnoho vyšších frekvenciách. Porovnanie výhod a nevýhod zmienených dvoch typov spínaných zdrojov je v tabuľke 1.

Tabuľka 1 Porovnanie vlastností spínaných zdrojov s frekvenciou siete a zdrojov s vyššou frekvenciou ako frekvencia siete

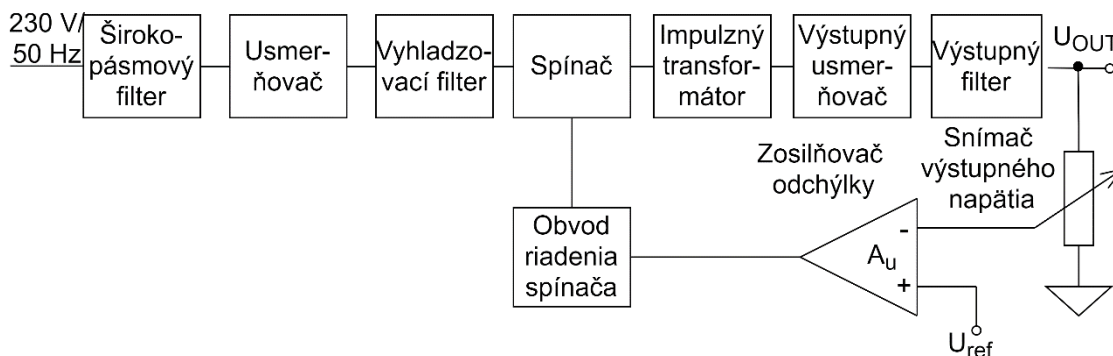
Spínané zdroje s frekvenciou	siete	vyššou ako frekvencia siete
	50 Hz	> 50 Hz
<b>Presnosť stabilizácie</b>	nižšia	vyššia
<b>Hmotnosť</b>	vyššia	nižšia
<b>Rozmery</b>	vyššie	nižšie
<b>Cena</b>	nižšia	vyššia
<b>Zvlnenie výstupu</b>	vyššie	nižšie
<b>Zložitosť obvodu</b>	nižšia	vyššia

Výhodou impulzných zdrojov je ľahká filtrovateľnosť zbytkov striedavej zložky, čo sa prejavuje pri značne vyšších frekvenciách ako 50 Hz. Preto je zvlnenie výstupného signálu zdrojov s frekvenciou siete vyššie. Aj napriek tejto jednoduchšej filtrovateľnosti je výstup spínaných zdrojov oproti lineárnym výrazne zvlnený. S rastúcou frekvenciou dosahujú zdroje lepšie parametre aj vďaka nutnosti zaradiť do obvodu kvalitnejšie a drahšie súčiastky.

V súvislosti so spínanými zdrojmi sa najčastejšie udáva zapojenie impulzných zdrojov, čiže zdrojov pracujúcich s vyššou frekvenciou ako je frekvencia siete a zdroje s frekvenciou siete sa neuvádzajú vôbec. Pre impulzné zdroje sa vyrába veľké množstvo meničov, ktoré stačí doplniť niekoľkými pasívnymi súčiastkami. Sú preto značne rozšírenejšie ako používanie zdrojov s triakmi a tyristormi.

Bloková schéma impulzného zdroja je vykreslená na obrázku 4. Na vstupe je zapojený širokopásmový odrušovací filter zamedzujúci prenikaniu rušivých signálov zo zdroja do siete. Odoberaný signál zo siete nie je, na rozdiel od lineárnych zdrojov, transformovaný na menšiu úroveň, ale najskôr je usmernený na jednosmerný signál a vyhladený filtrom. Je potrebné aby vyhladzovací filter bol dostatočne účinný na vyhladenie zvyškového zvlnenia pri frekvencii 50 Hz, pretože striedavá zložka kvôli nízkej frekvencii jednoducho prechádza celým filtrom až na výstup. Ako pri lineárnych zdrojoch, aj tu sa využívajú filtre LC, sú na nich však kladené vyššie nároky [6]. Pri napájaní zdroja z batérie usmerneným signálom na vyhladzovací filter sú nároky nižšie.

Privádzaný signál je striedačom spracovaný na obdĺžnikový signál s frekvenciou 20 kHz až 1 MHz, ktorý zabezpečujú výkonové tranzistory [6]. Impulzný transformátor konvertuje privádzaný striedavý obdĺžnikový signál na vyššie alebo nižšie hodnoty, následne sa usmerní na jednosmerný signál a výstupným filtrom sa zmierni zostatková striedavá zložka. Kvôli vysokým frekvenciám filter pracuje veľmi dobre oproti vstupnému filtru. V usmerňovači sa využívajú Schottkyho diódy, pretože požiadavky na ne sú vzhľadom na rýchle zmeny pri danej frekvencii náročnejšie ako na vstupe.



Obrázok 4 Bloková schéma spínaného napájacieho zdroja so znázornenými tvarmi priebehov signálov medzi jednotlivými blokmi

Spätná väzba pracuje rovnako ako v lineárnych zdrojoch. Zosilňovač odchýlky porovnáva výstupné napätie s referenčným napätím a ich rozdiel je zosilnený. Iné je riadenie spínania výkonového tranzistoru. V obvode riadenia striedača napäťová odchýlka mení striedu spínania, respektíve pomer doby zopnutia a rozopnutia tranzistoru. Najčastejšie sa na riadenie využíva impulzná šírková modulácia PWM, kedy sa zosilnený rozdiel napätí porovnáva komparátorom s napätím interného oscilátoru pílového priebehu a výsledné pulzy ovládajú spínanie. Pulzy majú premennú frekvenciu a striedu, čo vytvára na výstupnom signáli zvlnenie, ktoré výstupný filter neodstraňuje tak účinne [6].

Zvlnený výstup je značnou nevýhodou spínaných zdrojov. Na jednej strane pri vyššej frekvencii filtre dokážu striedavú zložku signálu lepšie zmierniť, pretože sú dostupné vhodné súčiastky na filtráciu, na druhej vysoká frekvencia a s ňou spojené rýchle spínanie tranzistorov spôsobuje ďalší výrazný šum, ktorý je nutné odfiltrovať. Pri využití PWM sa mení frekvencia a strieda, vplyvom čoho sa vytvára ďalšie zvlnenie.

Existuje viacero topológií DC-DC meničov v impulzných zdrojoch, a to [12]:

- meniče bez indukčnosti,
- meniče s indukčnosťou.

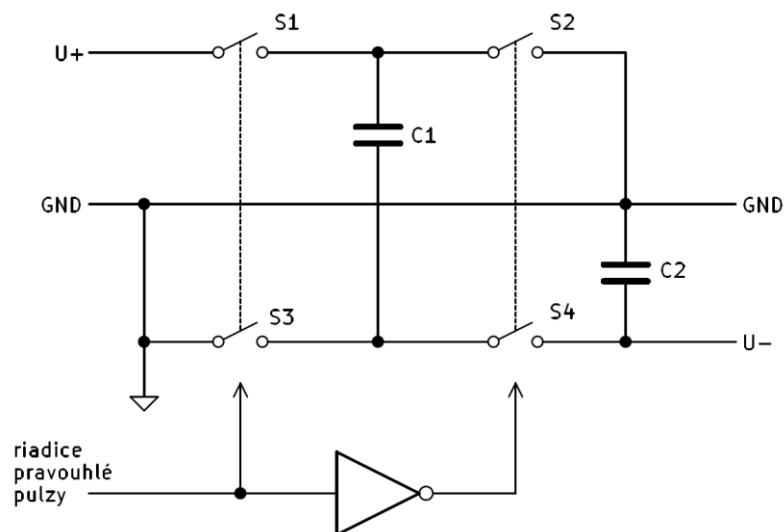
V meničoch bez indukčnosti sa uplatňuje spínanie kondenzátorov a v meničoch s indukčnosťou sa ako spínaný prvok aplikujú cievky. V zmienených topológiách nemusí byť nutne použitý impulzný transformátor. Ten sa využíva v aplikáciách s veľkými rozdielmi medzi vstupným a výstupným signálom, kedy je vhodné galvanické oddelenie

### 1.2.1 Meniče bez indukčnosti

Meničov bez indukčnosti, v ktorých tranzistory spínajú kondenzátory, sa nazývajú nábojové pumpy alebo kapacitné meniče. Rôzne prepojenia jednotlivých kondenzátorov umožňuje získať na výstupe napätie invertované, zvýšené alebo znížené. Používajú sa ako zdroje rôznych referenčných napätí alebo na napájanie operačných zosilňovačov záporným napätím (zapojenie invertora napätia). Využíva sa pravidelné prepínanie kondenzátorov na zdroj, kde fungujú ako záťaž (nabíjajú sa) a následne na výstup v rôznych kombináciách, kde sa vybíjajú, vyrovnáva sa na nich, a na záťaži napätie [12], [13].

Nábojová pumpa v zapojení invertora napätia je na obrázku 5. Spínače  $S1 - S4$  sú iba názorné a v reálnom zapojení sa využívajú rýchle tranzistory. Pri zopnutých spínačoch  $S1$  a  $S3$  predstavuje kondenzátor  $C1$  záťaž, a nabíja sa na napájacie napätie. V momente rozopnutia spínačov  $S1$ ,  $S3$  a zopnutia  $S2$ ,  $S4$  sa  $C1$  prepojí paralelne s  $C2$  a vyrovná sa medzi nimi napätie. Keďže sa spínačom  $S2$  pripojí kladná elektróda kondenzátoru  $C1$  na zem, spínačom  $S4$  záporná elektróda na výstup, takto sa dá z výstupu odoberať napätie opačnej polarita než je na vstupe.

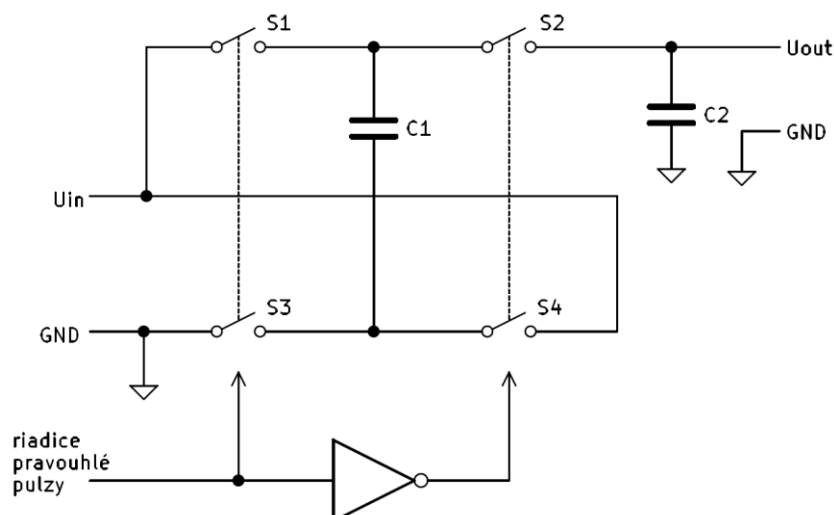
Napätia medzi kondenzátormi  $C1$  a  $C2$  sa ušľachťujú postupne a po dostatočnom množstve cyklov bude napätie na výstupe inverziou vstupného napätia. Pri pripojenej záťaži sa po dobu zopnutia spínačov  $S1$  a  $S3$  vybíja  $C2$ , čo spôsobuje zvlnenie na výstupe. Menšie zvlnenie sa dosiahne zvýšením frekvencie.



Obrázok 5 Zapojenie nábojovej pumpy ako invertor napätia, prevzaté z [13]

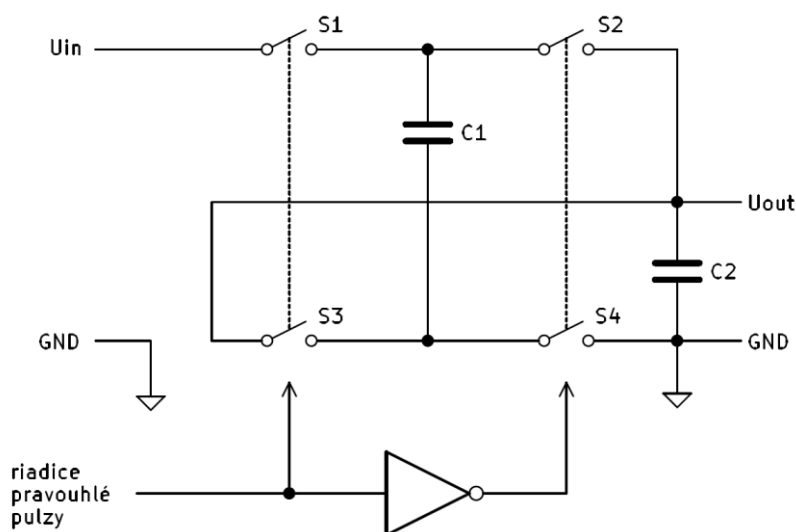
V zapojení zdvojovača na obrázku 6 sa kondenzátor  $C1$  pri zopnutých spínačoch  $S1$  a  $S3$  nabíja na hodnotu vstupného napätia. Po rozpojení týchto spínačov a zopnutí spínača  $S2$  a  $S4$  sa zapojí do série s napájacím napätím, čím sa výstup zdvojnásobí. Vtedy sa nabíja kondenzátor  $C2$  a počas nabíjania  $C1$  funguje ako zdroj prúdu pre pripojenú záťaž.





Obrázok 6 Zapojenie nábojovej pumpy ako zdvojovač napätia, prevzaté z [13]

Delič napätia z obrázku 7 funguje podobne ako ostatné dve zapojenia. Zopnutím spínačov  $S1, S3$  sa docieli sériového zapojenia kondenzátorov  $C1$  a  $C2$  na napájacie napätie. Nabijú sa na napätia v pomere prevrátaných hodnôt ich kapacít. Po rozopnutí  $S1, S3$  a zopnutí  $S2, S4$  budú kondenzátory zapojené paralelne s kladnými elektródami pripojenými na výstup a zápornými elektródami na zem. Napätie na nich sa vyrovná a bude mať polovičnú hodnotu vstupného napätia.



Obrázok 7 Zapojenie nábojovej pumpy ako delič napätia, prevzaté z [13]

Existujú rôzne zapojenia nábojových púmp, princíp u nich je rovnaký, mení sa počet spínačov a pomocou nich prepojenia kondenzátorov. Nábojové pumpy sú voľne dostupné ako integrované obvody, ku ktorým stačí pripojiť niekoľko externých súčiastok.

### 1.2.2 Meniče s indukčnosťou

Tranzistory v meničoch s indukčnosťou spínajú obvod s cievkou alebo s transformátorom. Izolované meniče obsahujú transformátor, zabezpečujúci galvanické oddelenie výstupu od vstupu, jeho cena je však vyššia a transformátor zaberá

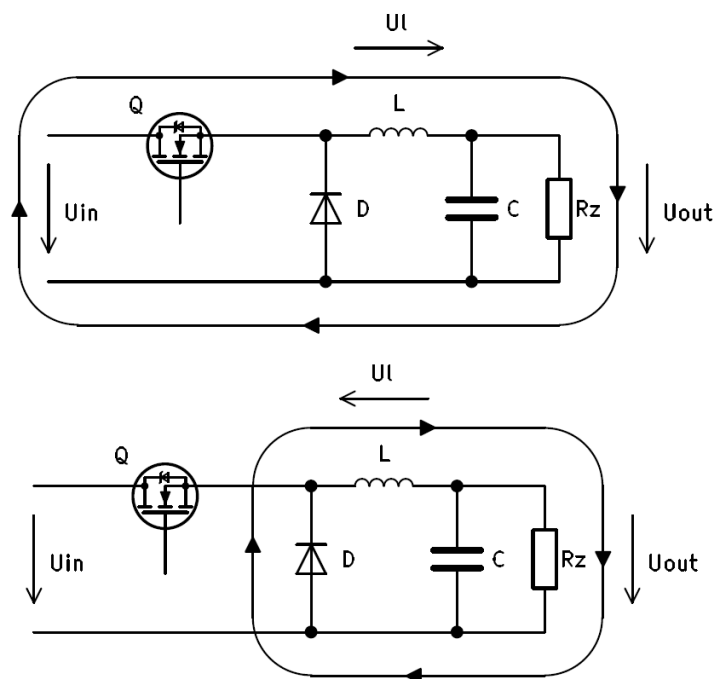
viac priestoru, čím zväčšuje rozmery meniča. Cievky sú lacnejšie, majú menšiu hmotnosť a rozmery, ale neoddeľujú výstup od vstupu, preto pri nich hovoríme o neizolovaných meničoch [6], [14].

Využíva sa schopnosť cievky uchovať energiu v podobe naidnukovaného poľa a po odpojení od napájania ju dodávať do zvyšku obvodu. Rozlišujú sa tri základné druhy indukčných meničov, a to zvyšujúci, znižujúci a invertujúci. Odlišujú sa spôsobom zapojenia cievky v rámci obvodu.

Znižujúci menič, tiež označený ako *step-down* alebo *buck*, má cievku umiestnenú sériovo so spínaným tranzistorom, ako je vidieť na obrázku 8. Pre jednoduchosť je miesto tranzistoru použitý spínač.

Kým je spínač zopnutý prúd prechádza obvodom cez cievku na záťaž. Napätie a prúd cievkou majú rovnakú orientáciu, pretože cievka je v úlohe spotrebiča. Rozopnutím spínača sa táto prúdová slučka preruší a cievku bude mať tendenciu prúd si udržať. Stáva sa preto zdrojom prúdu, napätie na nej zmení orientáciu a obvod sa uzatvorí cez diódu.

Kondenzátor  $C$  zmiernuje vlnenie výstupu, čím plní funkciu výstupného filtra. Pri zopnutom spínači sa nabíja a po jeho rozopnutí začne dodávať prúd do záťaže a napomáha tak cievke.

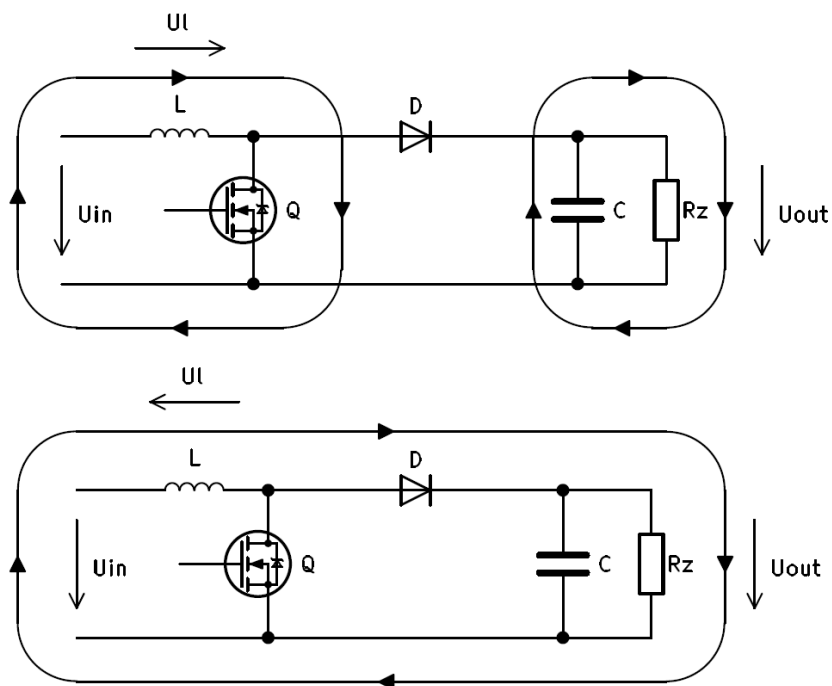


Obrázok 8 Zapojenie znižujúceho meniča pri zopnutom spínači (hore) a rozopnutom spínači (dole), prevzaté z [14]

Vo zvyšujúcom meniči, označovanom aj *step-up* alebo *boost*, je spínač zapojený paralelne k cievke. Kým je zopnutý, cievka sa správa ako spotrebič, napätie a prúd na nej majú rovnaký smer a akumulujú energiu. Dióda je polarizovaná záverne, pretože výstup je na vyššom potenciáli ako jej anóda, prúd z kondenzátora vo funkcii zdroja tým pádom neprechádza ňou, ale do záťaže.

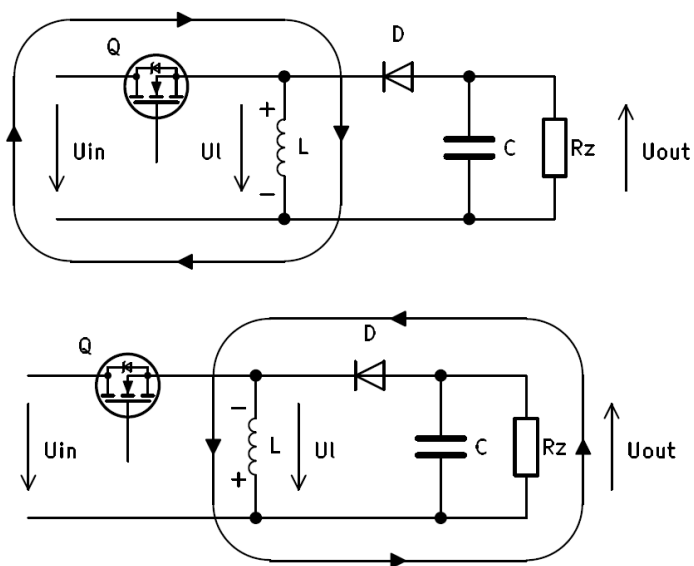
Po rozopnutí spínača sa cievka začne správať ako zdroj, napätie na nej zmení polaritu a sčíta sa s napätím na zdroji. Dióda sa vplyvom tohto otvorí a na záťaž sa dostane zvýšené napätie než aké je dodávané na vstup obvodu. Kondenzátor sa nabíja na rovnaké

napätie ako je na záťaži. Znázornenie obvodu a vytvorených prúdových slučiek je na obrázku 9.



Obrázok 9 Zapojenie zvyšujúceho meniča pri zopnutom spínači (hore) a rozpnutom spínači (dole), prevzaté z [14]

Zapojenie na obrázku 10 popisuje funkciu invertujúceho meniča. Zopnutý tranzistor zabezpečí tok prúdu cievkou v podobe spotrebiča a jej naakumulovanie energie, ktorú po vypnutí spínača, už ako zdroj využije na dodanie prúdu do záťaže a nabitie kondenzátora. Napätie na ňom bude rásť v opačnej polarite ako je na vstupe vplyvom smeru toku prúdu [6].



Obrázok 10 Zapojenie invertujúceho meniča pri zopnutom spínači (hore) a rozpnutom spínači (dole), prevzaté z [14]

Existujú aj kombinácie zmieny zapojení ako napríklad spojenie zvyšujúceho a znižujúceho meniča označované ako *Čuk*, ktoré dokážu ako napätie zvyšovať tak aj znižovať. Pre meniče s indukčnosťou platí rovnako ako pre nábojové pumpy, že existuje veľké množstvo integrovaných obvodov, s ktorými pracovať je jednoduché, pretože stačí pripojiť niekoľko súčiastok.

### 1.2.3 Porovnanie meničov s indukčnosťou a bez indukčnosti

Obidva typy meničov umožňujú konverziu na vyššie napätia, nižšie napätia a inverziu napájacieho napätia. Majú vysokú účinnosť, umožňujú regulovať výstup, ktorý je ale vplyvom spínania zvlnený. Zhrnuté hlavné rozdiely meničov s indukčnosťou a bez indukčnosti sú spísané v tabuľke 2.

Výhodou meničov bez indukčnosti je používanie kondenzátorov miesto cievok a transformátorov. Kondenzátory sú lacnejšie a menšie, kým cievky, respektíve transformátory, bývajú drahšie, rozmerovo väčšie a ťažšie. Vplyvom tohto zaberajú nábojové pumpy menší priestor na doske plošných spojov [6].

Tabuľka 2 Porovnanie odlišných vlastností meničov bez indukčnosti a s indukčnosťou [15]

	Meniče bez indukčnosti	Meniče s indukčnosťami
Výstupný prúd	nízky	vyšší
Cena	nižšia	vyššia
Galvanické oddelenie	nie	niektoré áno

Neprítomnosť cievok zamedzuje vzniku induktorových špičiek vyskytujúcich sa pri vypínaní indukčností, čím sa zároveň znižuje elektromagnetické vyžarovanie poľom. Špičkové prúdy vznikajúce pri spínaní kondenzátorov by mohli spôsobiť deštrukciu tranzistorových spínačov, preto sú určené na malé prúdy, ktoré ich nezničia [6]:

$$I_{\text{peak}} = \frac{du}{dt} \cdot C [A]. \quad (2)$$

Nábojové pumpy sa uplatňujú v aplikáciách, kde nie sú vysoké nároky na dodávaný prúd, pretože u nich býva malý, typicky 100 mA [6]. Vyššie hodnoty prúdov zabezpečujú meniče s indukčnosťou. Oproti nábojovým pumpám majú vyššiu účinnosť a meniče s transformátormi umožňujú aj galvanické oddelenie [15].

## 1.3 Rozdiely spínaných a lineárnych napájacích zdrojov

Hlavným rozdielom spínaných a lineárnych napájacích zdrojov je spôsob akým regulujú výstup, respektíve spôsob využitia regulačného tranzistoru. Lineárne zdroje ho zaťažujú permanentne a výstup nastavujú riadením tranzistora napätím. Spínané zdroje ho naopak zaťažujú impulzne, čiže je striedavo spínaný a rozpínaný. To umožňuje dosiahnuť omnoho vyššiu účinnosť, pretože z regulačného tranzistoru je možné odoberať väčší impulzný výkon.

Tabuľka 3 Porovnanie dôležitých vlastností lineárnych a spínaných zdrojov [1], [15]

	Lineárne zdroje	Spínané zdroje
<b>Účinnosť</b>	35 - 40 %	70 - 85 %
<b>Šum</b>	nízky	vysoký
<b>Hmotnosť</b>	vysoká	nízka až stredná
<b>Cena</b>	nízka	vysoká
<b>Zložitosť návrhu</b>	nízka	vysoká
<b>Počet výstupov</b>	1	niekoľko

Výhody spínaných zdrojov oproti lineárnym spočívajú práve vo vyššej účinnosti, uplatňujú sa v aplikáciách s väčšími rozdielmi vstupných a výstupných napätí, pretože sa u nich nedochádza k premene energie na teplo tak, ako tomu je pri lineárnych zdrojoch. V lineárnych zdrojoch je energia vyžiarená v podobe tepla daná ako rozdiel dodanej energie na jeho vstupe a odoberanej energie na výstupe. Vyžiarenú energiu spínaných zdrojov vyjadrujú spínacie straty.

Spínané zdroje približne do 5 W nie je nutné chladiť a nemusia obsahovať chladič, ktorý zväčšuje rozmery, a hmotnosť zariadenia. Chladenie spínaných zdrojov určených na väčšie výkony už potrebné je, ale ich chladenie je v porovnaní s lineárnymi zdrojmi určenými na rovnaký výkon menej náročné. Vplyvom tohto sú spínané zdroje menšie ako lineárne pri odoberaní rovnakého výkonu. Spínané napájacie zdroje umožňujú odoberanie viacerých výstupov rôznych polarít, čo sa uplatňuje napríklad v prenosných zariadeniach, letectve a automobilovom priemysle.

Lineárne zdroje sa uplatňujú v aplikáciách, v ktorých sú potrebné nízke výrobné náklady a krátka doba návrhu pričom na premene elektrickej energie na teplo a nízkej účinnosti nezáleží. Využívajú sa pre vstupné napätia do 40 V jednosmerných a je možné z nich odoberať iba jeden výstup. Majú rýchlu odozvu na zmenu vstupného napätia a výstupného prúdu. Keďže sa v nich neuplatňuje spínanie, výstup nie je zaťažovaný rušením a má malé zvlnenie. Zo zmienovaných výhod a nevýhod jednotlivých zdrojov vyplývajú údaje zhrnuté v prehľadnej tabuľke 3.

## 1.4 Filtrácia signálov

Jednou z hlavných požiadaviek na napájacie zdroje je nezvlnený a čo najmenej zašumený výstupný signál, preto sa pred výstupom zapája vhodný filter. Filter je nutné však zaradiť aj za usmerňovač, ako bolo naznačené v popise lineárnych a impulzných zdrojov, vtedy sa označuje ako vstupný vyhladzovací filter.

Filtre sa rozlišujú podľa frekvenčnej závislosti prenosu, ktoré prepúšťajú a ktoré naopak utlmujú na dolnú priepusť (DP), hornú priepusť (HP), pásmovú priepusť (PP) a pásmovú zádrž (PZ). V zapojeniach filtrov sa môžu využívať pasívne aj aktívne súčiastky. Z pasívnych súčiastok sa využívajú akumulčné prvky, čiže cievky a kondenzátory, z aktívnych napríklad tranzistory alebo operačné zosilňovače [3]. Podľa počtu akumulčných prvkov sa určuje stupeň filtra.

Účelom filtru je dodávaný signál vyhladiť, zamedziť prestupu zostatkovej striedavej zložky alebo šumu. Zvyčajne je nutné odstrániť striedavý signál a vzhľadom na túto skutočnosť sa v zdrojoch používa filter typu dolná priepusť.

Dolná priepusť prepúšťa signály do tohto filteru vstupujúce od najnižších frekvencií po frekvenciu označovanú ako medzná frekvencia  $f_M$ . Pri medznej frekvencii je pokles prenášaného signálu o 3 dB. Zvyšovaním frekvencie od tejto hodnoty bude pokles výraznejší a vstupujúci signál viac utlmený. Je požadované aby bol útlm prepúšťaných signálov čo najnižší, ideálne nulový. Signály s frekvenciou vyššou ako medzná frekvencia majú byť utlmené, pričom ideálnym stavom je keď takýto signál neprepustí filter na výstup vôbec.

Dolná priepusť prvého stupňa sa vytvára zapojením v prípade LR filteru cievky  $L$  sériovo k vstupu a rezistoru  $R$  paralelne k nemu, respektíve v prípade RC filteru rezistoru  $R$  sériovo k výstupu a kondenzátoru  $C$  paralelne, ako je vidieť na obrázku 11 vľavo (LR), respektíve vpravo (RC). Toto vychádza zo všeobecne známych vzťahov ich reaktancií  $X_L$ ,  $X_C$ :

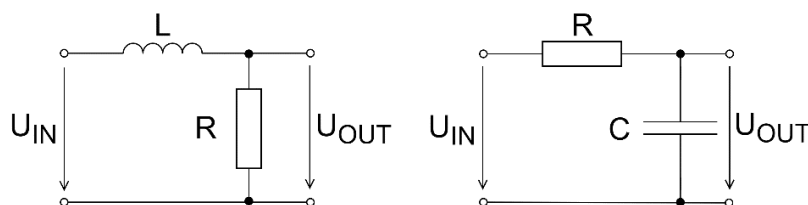
$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L [\Omega] \quad (3)$$

a

$$X_C = \frac{1}{\omega} \cdot C = \frac{1}{2\pi} \cdot f \cdot C [\Omega], \quad (4)$$

kde  $\omega$  je uhlová frekvencia a  $f$  je frekvencia signálu. Zo vzťahu 3, respektíve 4. je vidieť, že pri malých frekvenciách blízkyh nule je reaktancia cievky nízka a signál ňou je tlmeneý, cievka teda nebude mať na jednosmerný signál výrazný vplyv. Kondenzátor má pri frekvenciách blízkyh nule veľkú reaktanciu, čo spôsobí, že jednosmerná zložka sa cez neho nedostane na zem.

So zvyšujúcou frekvenciou reaktancia cievky rastie a reaktancia kondenzátora klesá. Pri vysokých frekvenciách je reaktancia cievky vysoká a zamedzuje prechodu signálu na výstup. Kondenzátor má nízku frekvenciu, takže signál pôjde na zem miesto na výstup.



Obrázok 11 Spôsob realizácie dolnej priepusti prvého stupňa LR (vľavo), RC (vpravo)

Medznú frekvenciu vyobrazených dolnopriepustných filterov dokážeme vyrátať všeobecne známymi vzťahmi:

$$f_M = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} [Hz] \quad (5)$$

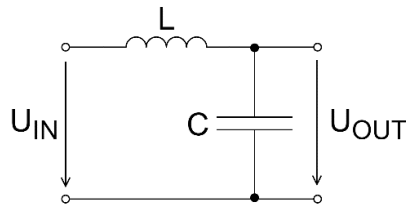
pre RC filter a

$$f_M = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{R}{L} [Hz] \quad (6)$$

pre LR filter. V zdrojoch sa zvyčajne RC filter nevyužíva, omnoho častejšie sa aplikuje filter LC s cievkou a kondenzátorom.

LC filter je filter typu dolná priepusť druhého stupňa, pretože obsahuje dva akumulčné prvky. Obsahuje vzhľadom k vstupu sériovo zapojenú cievku  $L$  a paralelne zapojený kondenzátor  $C$ , ako je vidieť na obrázku 12. Vplyvom dvoch akumulčných

prvkov dosahuje väčší pokles zosilnenia po prekročení medznej frekvencie, a to 40 dB na dekádu. Tento filter sa zapája aj do filtrov vyšších stupňov, kde sa zaradzovaním viacerých akumuláčnych prvkov dosiahne ešte výraznejší pokles.



Obrázok 12 Realizácia dolnej priepusti druhého stupňa LC

Vhodnosť LC filtrov do zdrojov je spôsobená tým, že neobsahuje rezistor, na ktorom by pri prechode veľkého prúdu dochádzalo k premene energie na teplo. LC filtre sú schopné znížiť nízkofrekvenčné zvlnenie aj vysokofrekvenčný šum. Toto dokáže aj LDO s funkciou filtrácie, jeho nevýhodou je však nízka účinnosť, premena energie na teplo a potreba ďalších externých súčiastok [16]. Výpočet medznej frekvencie LC filtra je rovnako ako pri vyššie zmienených filtroch všeobecne známa. Je daná Thomsonovým vzťahom, ktorý je:

$$f_M = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ [Hz]}. \quad (7)$$

Filter sa v zdrojoch využívajú napríklad po usmernení vstupného signálu, kedy sa najčastejšie zaradzuje iba paralelný kondenzátor a odpor predstavuje napríklad parazitné vedenie, vnútorný odpor zdroja, odpor vinutia transformátora. Na vyhladenie takéhoto zvlneného signálu sa uplatňujú kondenzátory s relatívne veľkou hodnotou kapacity [12].

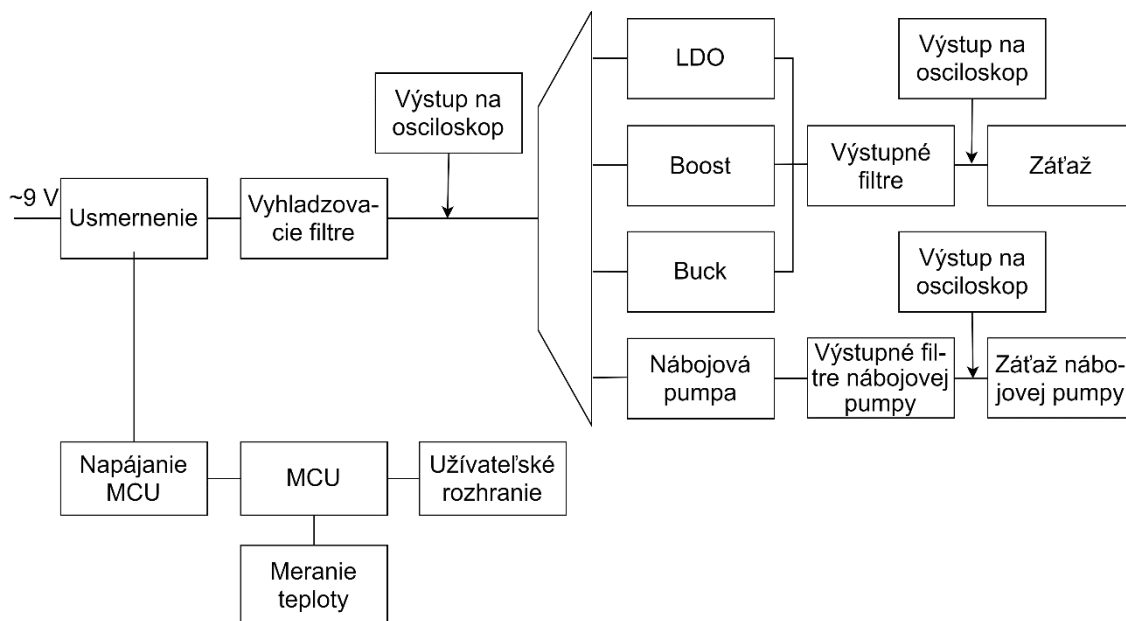
## 2. NÁVRH PRÍPRAVKU

Výukový prípravok má za úlohu predviesť vlastnosti viacerých zdrojov pri odlišne zvlnených vstupných signáloch, rozličnej filtrácii výstupného signálu a rozličnej záťaži. Demonštrované zdroje sú lineárny stabilizátor s nízkou hodnotou stratového napätia (ďalej ako *LDO*), menič s indukciou vo zvyšujúcom zapojení (ďalej ako *boost*), v znižujúcom zapojení (ďalej ako *buck*) a nábojová pumpa (ďalej ako *pumpa*). Prípravok umožňuje meranie ich vstupných a výstupných napätí a prúdov na osciloskope, aby bolo vidieť rozdiely signálu po jeho spracovaní príslušným zdrojom. Na každom zdroji je meraná jeho teplota. Jednotlivé funkčné bloky prípravku sú vidieť na obrázku 13.

Na vstupe prípravku je možné zvoliť medzi dvomi druhmi usmernenia, a to Graetzovým mostíkom a jednocestným usmerňovačom. Usmernený signál je podľa voľby užívateľa vyhladený rôznymi hodnotami kondenzátorov.

Výber požadovaného zdroja umožňujú tlačidlá, pričom môže byť zvolený vždy iba jeden zdroj. Vybraný zdroj indikuje LED dióda (z ang. *Light Emittinig Diode*) a vypíše sa na displeji spolu s jeho teplotou. So zdrojom je automaticky nastavená aj hodnota záťaže, ktorej zapojením do obvodu sa dosahuje jeden z najväčších výkonov a rovnako sa pri nej rozsvieti dióda. Zvolený zdroj sa do obvodu pripojí ďalším tlačidlom.

Napätie zo zdroja je možné filtrovať rozličnými filrami, prípadne nezaradiť žiaden filtračný prvok. Záťaž je rovnako voliteľná a zdroj nemusí byť zaťažný vôbec. Nábojová pumpa má filtre so záťažou samostatné, pretože je v zapojení invertora a keďže je schopná dodávať menšie prúdy ako ostatné zdroje, je u nej vhodné v záťaži použiť iné hodnoty odporov.



Obrázok 13 Kompletná bloková schéma výukového prípravku so zdrojmi

Riadenie bude zabezpečovať mikrokontrolér, ktorý bude užívateľ ovládať. Bude zabezpečovať spínanie pri stlačení tlačidiel, zapínanie LED, meranie teploty a jej vypisovanie na displej. Keďže výukový prípravok obsahuje riadiacu časť a časť so zdrojmi, pričom tieto časti majú odlišnú funkciu z hľadiska používateľa, budú popisované oddelene.



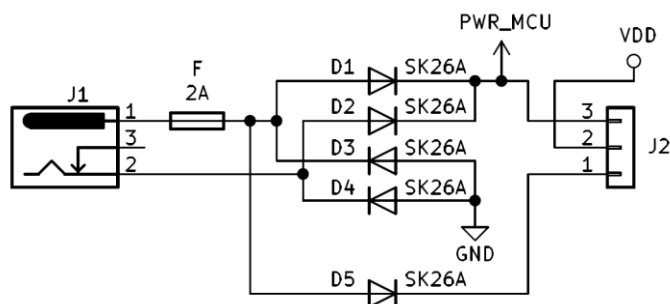
## 2.1 Zdrojová časť prípravku

Bloky prislúchajúce tejto časti výukového prípravku sú určené na nastavovanie používateľom. Poskytujú možnosť nastavenia rozličných parametrov, ktoré budú ovplyvňovať výstupný signál z jednotlivých zdrojov.

Efektívne striedavé napätie 9 V je do obvodu dodávané AC-AC (z ang. *Alternating Current*) adaptérom MC090A100 s výkonom 9 VA. Umožňuje teda odoberať efektívnu hodnotu prúdu maximálne 1 A. Adaptér sa pripája priamo do siete a na výstupe má súosový konektor.

### 2.1.1 Usmernenie vstupu

Dodávané napätie 9 V striedavých prechádza cez poistku a následne do usmerňovača. Z Graetzovho mostíka je permanentne odoberaný signál PWR\_MCU používaný na napájanie riadiacej časti obvodu. Umiestnením konektorovej prepojky na vývody 3 a 2 kolíkovej lišty bude do obvodu zapojený Graetzov mostík, na vývody 2 a 1 jednocestný usmerňovač, ako je vidieť zo schémy na obrázku 14.



Obrázok 14 Schéma usmerňovacej časti obvodu

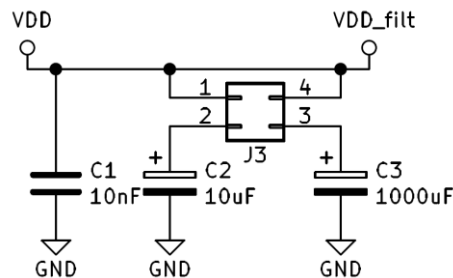
Bol zvolený DC konektor s vonkajším priemerom konektoru 5,5 mm a vnútorným priemerom konektoru 2,5 mm. Poistka bola zvolená 2 A tak, aby menovitá hodnota prúdu bola vyššia ako predpokladaný maximálny prúd, ktorý v danom obvode predstavuje 1 A. Obvodom bude prechádzať maximálne 1 A a napätie bude 9 V striedavých s frekvenciou 50 Hz. Na diódy v usmerňovačoch preto nie sú kladené zvláštne nároky a je možné použiť ľubovoľné diódy, ktoré sú vhodné na danú prúdovú a výkonovú zaťažiteľnosť. Bola preto vybraná dióda SK26A od firmy TAIWAN SEMICONDUCTOR [17]. Napätie po usmernení, v schéme označené VDD, ďalej označené  $U_{VDD}$ , sa dá vyčísliť ako:

$$U_{VDD} = U_{in} \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot U_d, \quad (8)$$

kde  $U_{in}$  je napájacie napätie z adaptéra, ktoré je ale efektívne, preto je nutné ho ešte vynásobiť odmocninou z dvoch a  $U_d$  je napätie na dióde v priepustnom smere, výrobca udáva 0,7 V [17]. Usmernené napätie bude približne 11,33 V pri obidvoch usmerňovačoch, pretože v jednocestnom usmerňovači sa bude signál vraciť do konektoru cez zem a v ceste mu stojí ešte dióda z Graetzovho mostíku. Z toho vyplýva že na obidvoch usmerňovačoch bude úbytok približne 1,4 V. Graetzov mostík je realizovaný diódami a nie jednou súčiastkou, pretože v jednocestnom usmerňovači sa bude používať dióda, akú je možné použiť aj v jeho zapojení, nie je teda nutné vybrať ďalšiu súčiastku. Na voľbu usmerňovača je pripravená trojvývodová kolíková lišta.

### 2.1.2 Vyhladzovacie filtre

Vo vyhladzovacom filtri sú zapojené paralelne tri odlišné kondenzátory a pomocou dvoch konektorových prepajok je možné nakombinovať štyri rôzne prepojenia vyhladzovacieho filtru. Z obrázku 15 je vidieť, že medzi kondenzátormi sa nenachádza žiadny iný prvok, filter sa bude správať ako jeden kondenzátor s kapacitou danou súčtom kapacít zapojených kondenzátorov. Kondenzátor *C1* je do obvodu zapojený vždy, aby bol usmernený signál, najmä z jednocestného usmerňovača, aspoň trochu vyhladený. Kondenzátory *C2* a *C3* do obvodu môžu byť zapojené naraz, po jednom alebo vôbec.



Obrázok 15 Schéma vyhladzovacích vstupných filtrov

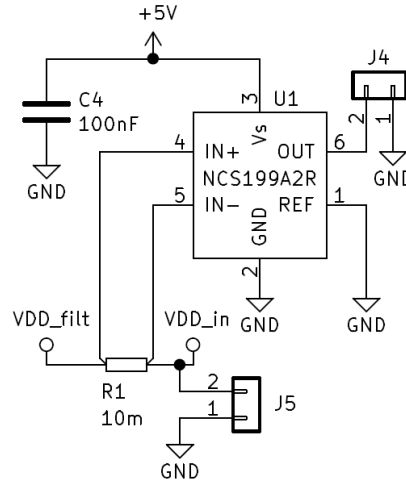
Konkrétne hodnoty kapacít kondenzátorov boli zvolené 10 nF pre kondenzátor *C1*, 10  $\mu$ F pre kondenzátor *C2* a pre *C3* 1000  $\mu$ F. Takéto kondenzátory sú bežne dostupné, vzhľadom na čo nie je nutné vyberať konkrétny typ.

### 2.1.3 Výstup na osciloskop

Prípravok umožňuje merať napätie a prúd vstupujúci do jednotlivých zdrojov, respektíve do záťaže pomocou osciloskopu. Pre tento účel sú vyvedené dve kolíkové lišty, ako je znázornené na obrázku 16. Podľa tohto obrázku je lišta *J4* určená na meranie prúdu a lišta *J5* na meranie napätia. Zmienené veličiny sú v obvode merané celkovo trikrát, a to na vstupe do zdrojov a pred ich záťažou. Keďže má nábojová pumpa záťaž oddelenú od ostatných zdrojov je tu potrebné zabezpečiť aj samostatné meranie.

Napätie sa meria paralelne k vetve voči zemi. Meria sa až za rezistorom *R1*, pretože na ňom vzniká úbytok napätia, hoci malý, o ktorý je napätie privádzané k zdrojom menšie a účelom je merať napätie na vstupe jednotlivých zdrojov.

Prúd sa meria pomocou zisťovania úbytku na snímacom rezistore *R<sub>SHUNT</sub>* (na schéme na obrázku 16 mu odpovedá rezistor *R1*), ktorý je následne zosilnený zosilňovačom a privádzaný na výstup. Je nutné zvoliť vhodnú hodnotu odporu rezistoru *R<sub>SHUNT</sub>*, ktorá nesmie byť príliš malá, pretože meraný prúd bude potom zašumený a nesmie byť ani príliš veľká, pretože by spôsobil výraznejší úbytok napätia. Na zosilnenie úbytku napätia bol zvolený prúd snímajúci zosilňovač NCS199A2R od firmy ON SEMICONDUCTOR so zosilnením 100 na požadovanej frekvencii, pretože umožňoval napájanie napätím 5 V a *high-side* meranie prúdu. Na jeho napájanie sa používa rovnaké napätie ako na napájanie riadenia a jednou z jeho výhodných vlastností je malý odber prúdu, ktorý je maximálne 80  $\mu$ A, typicky však 40  $\mu$ A [18].



Obrázok 16 Schéma zapojenia na meranie napätia a prúdu na vstupe zdrojov

Vzťah pre výstupné napätie  $U_{OUT\_AMP}$  je výrobcom udávaný ako [18]:

$$U_{OUT\_AMP} = (I_{RSHUNT} \cdot R_{SHUNT}) \cdot A_U + U_{REF\_AMP} [V], \quad (9)$$

kde  $I_{RSHUNT}$  je prúd prechádzajúci snímacím odporom  $R_{SHUNT}$ ,  $A_U$  je zosilnenie a  $U_{REF\_AMP}$  je referenčné napätie. V zapojení pre meranie prúdu na vstupe a na záťaži LDO a zdrojov s indukčnosťou je referenčné napätie 0 V. V zapojení pre meranie prúdu záťažou nábojovej pumpy je vývod GND pripojený na rovnaký potenciál ako vývod IN–, aby bolo možné merať zápornú hodnotu prúdu. Pomocou vzťahu 9, znalosti prúdu  $I_{RSHUNT}$  a napájacieho napätia, ktorým je obmedzená maximálna hodnota výstupu, je možné dopočítať potrebné hodnoty odporov snímacích rezistorov. V jednotlivých miestach merania prúdu v rámci obvodu budú rôzne hodnoty snímacích rezistorov v závislosti na tamojšom prúde.

Výstupné napätie  $U_{OUT\_AMP}$  bolo zvolené 1 V pre jednoduchšie odčítavanie hodnôt z osciloskopu, pretože hodnota 1V bude prislúchať prúdu 1 A. Výpočet odporu  $R_{SHUNT}$  vyjadrením z rovnice 9 je:

$$R_{SHUNT} = \frac{U_{OUT\_AMP}}{I_{RSHUNT} \cdot A_U} = \frac{1}{1 \cdot 100} = 10 \text{ m}\Omega. \quad (10)$$

Bude použitý rezistor WW08RR010FTL od firmy WALSIN s odporom 10 mΩ [19]. Rovnaký odpor sa použije pre meranie prúdu v záťaži meničov s indukčnosťou a stabilizátora. Odpor snímacieho rezistoru v meraní prúdu záťažou nábojovej pumpy bol zvolený 1 Ω, pretože jej výstupný prúd bude rádovo v desiatkach mA. Pri prúde 10 mA bude v tomto prípade na výstupe 1V. Rezistor s odporom 1 Ω je bežne dostupný a nie je nutné vyberať konkrétny typ. Kondenzátor C4 plní funkciu blokujúceho kondenzátoru a jeho hodnotu odporúča výrobca od 0,01 μF do 0,1 μF, bude použitá hodnota 0,1 μF.

## 2.1.4 Zdroj s LDO

V rámci zdroju s LDO je možnosť vybrať si medzi dvomi hodnotami výstupného napätia. Pri zapojení prepajky na vývody 2, 3, respektíve 2, 1 kolíkovej lišty bude výstupné napätie 6 V, respektíve 9 V. Pri napätí 6 V sa bude stabilizátor viac zahrievať, čo bude pozorovateľné na vypísanej zmeranej teplote na displeji. Napätie 9 V má demonštrovať malé stratové napätie, ktorým LDO disponuje.

Zvolený nastaviteľný LDO napäťový regulátor NCP1117LP od firmy ON SEMICONDUCTOR je svojimi vlastnosťami vhodný pre účel prípravku [20]. Jeho maximálny prúd je 1 A, pri ktorom je maximálne stratové napätie 1,4 V, typicky 1,3 V, maximálne vstupné napätie 18 V. Súčiastka sa bude vplyvom veľkého prúdu a pri veľkom poklese napätia na nej prehrievať, preto sú vybrané napätia a prúdy, dané voľbou hodnôt záťaže také, aby nedošlo k poškodeniu, eventuálne zničeniu LDO.

Medzi vývodmi výstup, na obrázku 17 označenom ako VO (z ang. *Voltage Output*) a ADJ (z ang. *Adjust*), je stály úbytok napätia. Rezistor  $R10$  medzi týmito vývodmi má funkciu prúdového zdroja. Prúd tečie cez rezistory  $R11$ ,  $R12$ ,  $R13$  na zem a spôsobuje na nich úbytok napätia, ktorým sa nastavuje výstupné napätie.

Obrázok 17 zobrazuje spôsob akým je stabilizátor regulovaný, a to pomocou napäťového deliča. Pre prípad, že nebude zapojený ani jeden z rezistorov  $R12$  a  $R13$ , je k nim paralelne zaradený rezistor  $R11$  s vhodne zvolenou hodnotou odporu. Ak by nebola spätná väzba uzemnená cez rezistor, obvod by sa mohol správať nepredvídateľne. Hodnoty odporov rezistorov sa dajú dopočítať zo vzťahu pre výstupné napätie daného výrobcom ako [20]:

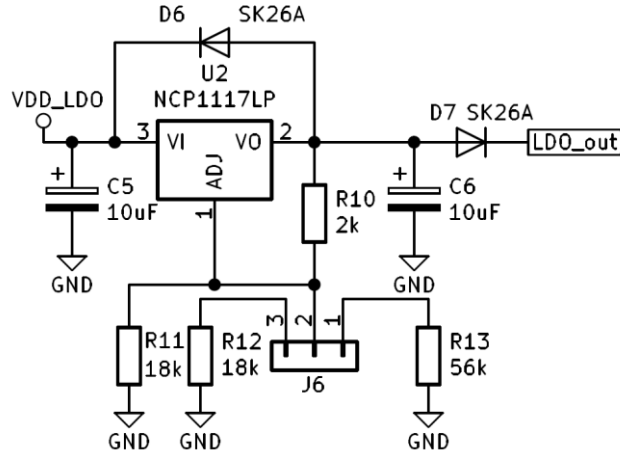
$$U_{OUT\_LDO} = U_{REF\_LDO} \left( 1 + \frac{R_{B\_LDO}}{R_{A\_LDO}} \right) + R_{B\_LDO} \cdot I_{ADJ} [V], \quad (11)$$

kde  $U_{OUT\_LDO}$  je výstupné napätie,  $U_{REF\_LDO}$  referenčné napätie (typicky 1,25 V),  $R_{B\_LDO}$  je odpor rezistorov nastavujúcich výstupné napätie,  $R_{A\_LDO}$  odpor rezistoru, na ktorom je referenčné napätie a  $I_{ADJ}$  je prúd vývodom ADJ. V zapojení LDO na obrázku 17 je paralelná kombinácia rezistorov  $R11$  a  $R12$  respektíve  $R13$  ekvivalentom  $R_{B\_LDO}$  a rezistoru  $R10$  je ekvivalent  $R_{A\_LDO}$ .

Kondenzátor na vstupe je blokovací a mal by mať veľkú kapacitu. Vhodný je kondenzátor s kapacitou 10  $\mu\text{F}$  s ekvivalentným sériovým odporom ESR (z ang. *Equivalent Series Resistance*) medzi 20 m $\Omega$  a 20  $\Omega$ . Na výstup sa zapája kondenzátor s kapacitou minimálne 10  $\mu\text{F}$  [20].

Ochrannú diódu, v schéme označenú  $D6$ , výrobca odporúča zapojiť v prípade, ak by sa vstupné napätie mohlo skratovať a výstupný kondenzátor  $C6$  by bol väčší ako 50  $\mu\text{F}$ . Keďže za týmto blokom nasleduje blok s filrami, mohlo by dôjsť k zapojeniu, kedy by bola kapacita väčšia ako 50  $\mu\text{F}$  a ak by užívateľ zapojil nesprávne osciloskop pred vstupom do obvodu a takýmto spôsobom uzemnil vstup, mohlo by dôjsť k poškodeniu. Použije sa rovnaká dióda ako v usmerňovačoch, aby sa znížil počet rozličných súčiastok [17].

Rovnaká dióda sa uplatní pred výstupom, na obrázku 17 označená ako  $D7$  a tu zabezpečuje funkciu diódového hradla. To znamená, že pri zapnutom inom zdroji, nebude na LDO prenikať napätie a prúd z neho. Takáto dióda sa nachádza aj v zapojení indukčných meničov. Na všetkých týchto zdrojoch je teda nutné výstupné napätie nastavovať o 0,7 V väčšie, aby bolo na záťaž dodávané užívateľom nastavované napätie.



Obrázok 17 Schéma zapojenia LDO

Pomocou grafu závislosti výkonu na ploche medi na doske plošných spojov, pri predpoklade, že pre LDO bude vyhradená plocha približne  $500 \text{ mm}^2$ , bol určený maximálny stratový výkon  $P_{MAX\_LDO}$   $1,5 \text{ W}$  [20]. Najväčší úbytok na LDO bude pri minimálnom výstupnom napätí  $U_{OUT6,7\_LDO}$  nastavenom na  $6,7 \text{ V}$ , v ktorom je už započítané prípustné napätie na dióde  $D7$ . Z tohto je možné určiť maximálny prúd  $I_{MAX\_LDO}$ , ktorý sa použije na určenie hodnôt odporov záťaže:

$$I_{MAX\_LDO} = \frac{P_{MAX\_LDO}}{U_{VDD} - U_{OUT6,7\_LDO}} = \frac{1,5}{11,33 - 6,7} \cong 250 \text{ mA}. \quad (12)$$

$U_{VDD}$  je usmernené napätie z adaptéra. Odpor rezistoru  $R_{A\_LDO}$  bude v tomto zapojení označený  $R10$  podľa schémy a zvolí sa  $2 \text{ k}\Omega$ . Zo vzťahu 11 sa vyjadří  $R_{B\_LDO}$ , pričom sa zanedbá zložka s prúdom  $I_{ADJ}$ , pretože nadobúda malé hodnoty. Najskôr sa vypočítajú rezistory v schéme označené  $R11$  a  $R12$  (ich paralelná kombinácia je označená  $R_{B6,7\_LDO}$ ), ktorých zapojením do obvodu sa na výstupe nastaví napätie  $U_{OUT6,7\_LDO}$   $6,7 \text{ V}$ :

$$R_{B6,7\_LDO} = \left( \frac{U_{OUT6,7\_LDO}}{U_{REF\_LDO}} - 1 \right) \cdot R10 = \left( \frac{6,7}{1,25} - 1 \right) \cdot 2 \cdot 10^3 = 8,72 \text{ k}\Omega. \quad (13)$$

Rezistorom  $R11$  a  $R12$  priradíme rovnakú hodnotu, a to dvojnásobok vypočítaného odporu  $R_{B6,7\_LDO}$ , čiže  $18 \text{ k}\Omega$ , podľa odporovej rady E12. Paralelná kombinácia  $R_{B9,7\_LDO}$  odporov označených v schéme  $R11$  a  $R13$ , pri napätí na výstupe  $9,7 \text{ V}$  vyjde:

$$R_{B9,7\_LDO} = \left( \frac{U_{OUT9,7\_LDO}}{U_{REF\_LDO}} - 1 \right) \cdot R10 = \left( \frac{9,7}{1,25} - 1 \right) \cdot 2 \cdot 10^3 = 13,52 \text{ k}\Omega. \quad (14)$$

Z paralelnej kombinácie dvoch odporov sa dopočíta posledná neznáma hodnota odporu rezistoru  $R13$ :

$$R13 = \frac{R11 \cdot R_{B9,7\_LDO}}{R11 - R_{B9,7\_LDO}} = \frac{18 \cdot 10^3 \cdot 13,52 \cdot 10^3}{18 \cdot 10^3 - 13,52 \cdot 10^3} \cong 54 \text{ k}\Omega. \quad (15)$$

Opäť sa vyberie hodnota z niektorej odporovej rady. Odpor v deliči teda vyšli pre  $R10$   $2 \text{ k}\Omega$ ,  $R11$   $18 \text{ k}\Omega$ ,  $R12$   $18 \text{ k}\Omega$  a  $R13$   $56 \text{ k}\Omega$ .

### 2.1.5 Indukčný menič *boost*

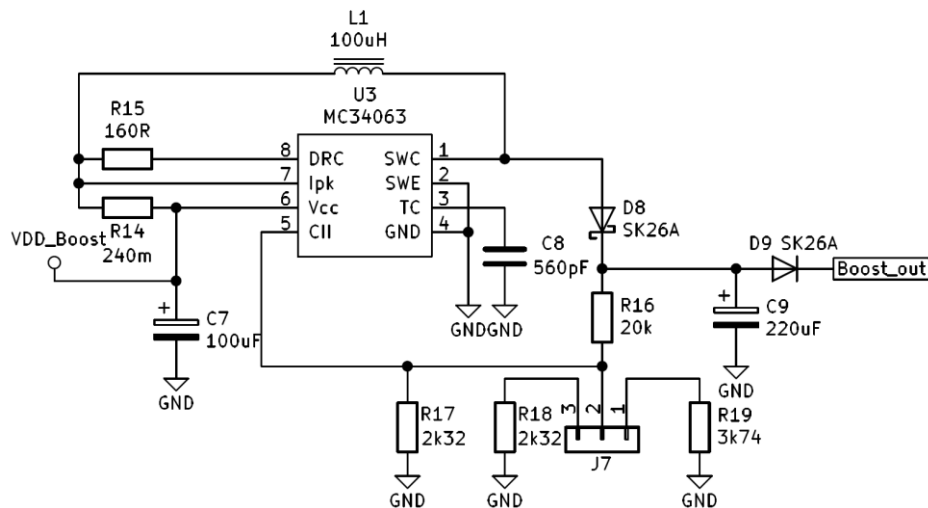
Podobným spôsobom ako pri LDO sa aj tu vyberajú požadované napätia na výstupe. Pri prepojke na vývodoch 2, 3 kolíkovej lišty J7 sa výstupné napätie nastaví na 22 V a na vývodoch 1, 2 na 18 V.

Vhodný menič s indukčnosťou musí zvládnuť vstupné napätie okolo 11 V, dodávať výstupný prúd približne 1 A, hoci reálne ním potečie menej, musí byť regulovateľný a ideálne má byť vhodný ako na zapojenie zvyšujúce tak aj znižujúce. Požiadavky spĺňal nastaviteľný DC-DC menič MC34063ACD od firmy STMICROELECTRONICS, schopný dodať až 1,5 A na výstup [21].

Zapojenie na obrázku 18 vychádza z katalógového listu a je doplnené o ďalšie rezistory v deliči, rovnako ako v zapojení LDO. Takisto sa tu nachádza rezistor s vhodným odporom nastalo pripojený medzi rezistor R16 a zem, aby bol invertujúci vývod CII (z ang. *Comparator Inverting Input*) vždy zapojený cez delič. Výstupné napätie  $U_{OUT\_BOOST}$  je určené odporom  $R_{A\_BOOST}$ , na ktorom je referenčné napätie 1,25 V a  $R_{B\_BOOST}$ , ktorého úbytok napätia nastavuje veľkosť výstupného napätia. Toto napätie sa vyčísľuje rovnako pre zvyšujúci aj znižujúci menič podľa vzťahu [21]:

$$U_{OUT\_BOOST} = 1,25 \cdot \left( 1 + \frac{R_{B\_BOOST}}{R_{A\_BOOST}} \right) [V]. \quad (16)$$

Dióda použitá v zapojení musí mať malý úbytok napätia a musí byť dostatočne prúdovo zaťažiteľná, čo spĺňa Schottkyho dióda SK26A od firmy TAIWAN SEMICONDUCTOR [17]. Ide o rovnaké diódy ako sú použité v usmerňovačoch a pri LDO, sú vhodné pre všetky aplikácie a odpadá potreba viacerých typov diód.



Obrázok 18 Schéma zapojenia meniča s indukčnosťou ako *boost*

Hodnoty použitých externých súčiastok je nutné dopočítať pomocou vzťahov udávaných výrobcom [21]. Boli zvolené parametre obvodu, a to výstupné napätie  $U_{OUT22,7\_BOOST} = 22,7$  V, minimálna predpokladaná hodnota vstupného napätia  $U_{IN(min)} = 9$  V. Pre podiel doby zopnutia  $t_{on\_BOOST}$  a rozopnutia  $t_{off\_BOOST}$  tranzistoru, platí:

$$\frac{t_{on\_BOOST}}{t_{off\_BOOST}} = \frac{U_{OUT22,7\_BOOST} + U_D - U_{IN(min)}}{U_{IN(min)} - U_{sat}} = \frac{22,7 + 0,7 - 9}{9 - 1} = 1,80. \quad (17)$$

Priepustné napätie diódy  $U_D$  je 0,7 V,  $U_{sat}$  je saturačné napätie na spínacom prvku, typicky 1 V. Zvolená minimálna frekvencia  $f_{min}$  je 50 kHz. Maximálna perióda sa vypočíta:

$$(t_{on\_BOOST} + t_{off\_BOOST})_{max} = \frac{1}{f_{min}} = \frac{1}{50 \cdot 10^3} = 20 \mu s. \quad (18)$$

Doba  $t_{off\_BOOST}$  a  $t_{on\_BOOST}$  sa vypočítajú podľa vzťahov:

$$t_{off\_BOOST} = \frac{\frac{1}{f_{min}}}{\frac{t_{on\_BOOST}}{t_{off\_BOOST}} + 1} = \frac{\frac{1}{50 \cdot 10^3}}{1,8 + 1} \cong 7,14 \mu s \quad (19)$$

a

$$t_{on\_BOOST} = \frac{1}{f_{min}} - t_{off\_BOOST} = \frac{1}{50 \cdot 10^3} - 7,14 \cdot 10^{-6} \cong 12,86 \mu s. \quad (20)$$

Kapacita časovacieho kondenzátora  $C8$  zo schémy na obrázku 18 (výrobca ho označuje  $C_T$ ), sa určuje vzťahom:

$$C8 = 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot t_{on\_BOOST} = 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 12,86 \cdot 10^{-6} \cong 560 pF. \quad (21)$$

Zvolený maximálny výstupný prúd  $I_{MAX\_BOOST}$  je 200 mA. Pre špičkový prúd spínača  $I_{PK(switch)\_BOOST}$  platí:

$$\begin{aligned} I_{PK(switch)\_BOOST} &= 2 \cdot I_{MAX\_BOOST} \cdot \left( \frac{t_{on\_BOOST}}{t_{off\_BOOST}} + 1 \right) = 2 \cdot 0,2 \cdot (1,8 + 1) = \\ &= 1,12 A. \end{aligned} \quad (22)$$

Bolo zvolené zvlnenie výstupného napätia  $U_{ripple(p-p)\_BOOST}$  100 mV. Pre kapacitu výstupného kondenzátora, v schéme označenom  $C9$  (výrobca ho označuje  $C_O$ ), potom platí:

$$C9 = \frac{9 \cdot I_{MAX\_BOOST} \cdot t_{on\_BOOST}}{U_{ripple(p-p)}} = \frac{9 \cdot 0,2 \cdot 12,86 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-3}} \cong 220 \mu F. \quad (23)$$

Minimálna hodnota indukčnosti cievky  $L_{min\_BOOST}$  sa dopočíta zo vzťahu:

$$\begin{aligned} L_{min\_BOOST} &= \left( \frac{U_{IN(min)} - U_{sat}}{I_{PK(switch)\_BOOST}} \right) \cdot t_{on\_BOOST} = \left( \frac{9 - 1}{1,12} \right) \cdot 12,86 \cdot 10^{-6} = \\ &= 91,86 \mu H. \end{aligned} \quad (24)$$

V obvode sa použije cievka  $L1$  s indukčnosťou 100  $\mu H$ . Odpor rezistoru obmedzujúceho prúd  $R14$  (výrobca ho označuje  $R_{SC}$ )  $R_{SC}$  medzi vývodmi Vcc (z ang. *Voltage Supply*) a Ipk (z ang. *Current Limit Sense*), na obrázku 18 označený ako  $R14$  sa vypočíta zo špičkového prúdu  $I'_{PK(switch)\_BOOST}$ , vychádzajúceho z minimálnej indukčnosti cievky, pri napätí na vstupe  $U_{IN\_BOOST} = 11$  V podľa nasledujúceho postupu:

$$\begin{aligned} I'_{PK(switch)\_BOOST} &= \left( \frac{U_{IN\_BOOST} - U_{sat}}{L_{min\_BOOST}} \right) \cdot t_{on\_BOOST} = \\ &= \left( \frac{11 - 1}{91,86 \cdot 10^{-6}} \right) \cdot 12,86 \cdot 10^{-6} = 1,40 A \end{aligned} \quad (25)$$

a

$$R14 = \frac{0,3}{I_{PK(switch)}_{BOOST}} = \frac{0,3}{1,40} \cong 0,24 \Omega. \quad (26)$$

V zapojení na obrázku 18 predstavuje odpor rezistoru  $R16$  odpor  $R_{B\_BOOST}$ , paralelná kombinácia rezistorov  $R17$  s  $R18$  odpor  $R_{A22,7\_BOOST}$  a paralelná kombinácia rezistorov  $R17$  s  $R19$  odpor  $R_{A18,7\_BOOST}$ .

Odpor rezistoru  $R16$  sa zvolí  $20 \text{ k}\Omega$ . Zo vzťahu 16 sa vyjadrí  $R_{A\_BOOST}$  označený ako  $R_{A22,7\_BOOST}$  pre výstupné napätie  $22,7 \text{ V}$  a vypočíta sa odpor rezistorov  $R17$  a  $R18$ , ktorých zapojením do obvodu sa na výstupe nastaví napätie  $U_{OUT22,7\_BOOST} 22,7 \text{ V}$ :

$$R_{A22,7\_BOOST} = \frac{1,25 \cdot R16}{U_{OUT22,7\_BOOST} - 1,25} = \frac{1,25 \cdot 20 \cdot 10^3}{22,7 - 1,25} = 1,17 \text{ k}\Omega. \quad (27)$$

Rezistorom  $R17$  a  $R18$  priradíme rovnakú hodnotu, a to dvojnásobok vypočítaného odporu  $R_{A22,7\_BOOST}$ , čiže  $2,32 \text{ k}\Omega$ , podľa odporovej rady E12. Odpor  $R_{A18,7\_BOOST}$ , pri napätí na výstupe  $U_{OUT18,7\_BOOST} 18,7 \text{ V}$  vyjde:

$$R_{A18,7\_BOOST} = \frac{1,25 \cdot R16}{U_{OUT18,7\_BOOST} - 1,25} = \frac{1,25 \cdot 20 \cdot 10^3}{18,7 - 1,25} = 1,43 \text{ k}\Omega. \quad (28)$$

Z odporu  $R_{A18,7\_BOOST}$  paralelnej kombinácie rezistorov  $R17$  a  $R19$  sa dopočíta posledná neznáma hodnota odporu rezistoru  $R19$ :

$$R19 = \frac{R17 \cdot R_{A18,7\_BOOST}}{R17 - R_{A18,7\_BOOST}} = \frac{2,32 \cdot 10^3 \cdot 1,43 \cdot 10^3}{2,32 \cdot 10^3 - 1,43 \cdot 10^3} \cong 3,75 \text{ k}\Omega. \quad (29)$$

Vyberie sa hodnota z odporovej rady E96. Výsledné odpory sú  $20 \text{ k}\Omega$  pre rezistor  $R16$ ,  $2,32 \text{ k}\Omega$  pre rezistory  $R17$  a  $R18$ , a odpor  $3,74 \text{ k}\Omega$  pre rezistor  $R19$ .

Hodnota odporu kolektoru vnútorného tranzistoru  $R15$  (označenie výrobcu je  $R_{driver}$ ) sa vypočíta:

$$R15 = \frac{U_{IN\_BOOST} - U_{sat} - R14 \cdot I_{PK(switch)}_{BOOST}}{\frac{I_{PK(switch)}_{BOOST}}{B_F} + 4,1 \cdot 10^{-3}} = \frac{11 - 1 - 0,24 \cdot 1,12}{\frac{1,12}{20} + 4,1 \cdot 10^{-3}} \cong \cong 160 \Omega, \quad (30)$$

kde  $B_F$  je nútené zosilnenie tranzistoru, podľa katalógového listu [21] je 20.

### 2.1.6 Indukčný menič buck

Zapojenie indukčného meniča *buck* ponúka na výber opäť dve napätia. Sú to  $6 \text{ V}$  s prepojkou na vývodoch 2, 3 kolíkovej lišty  $J8$  a  $3 \text{ V}$  s prepojkou na vývodoch 2,1. Je zvolené jedno rovnaké napätia ako pri LDO, aby sa ich vlastnosti dali ľahšie porovnať.

DC-DC menič použitý na *boost*, sa uplatňuje aj v zapojení *buck*, ktorého schéma je znázornená na obrázku 19. Pre použité diódy platia rovnaké informácie zmienené pri *boost*.





Bolo zvolené zvlnenie výstupného napätia  $U_{ripple(p-p)_{BUCK}}$  10 mV. Pre výpočet kapacity výstupného kondenzátora  $C12$  potom platí:

$$\begin{aligned} C12 &= \frac{I_{PK(switch)_{BUCK}} \cdot (t_{on_{BUCK}} + t_{off_{BUCK}})}{8 \cdot U_{ripple(p-p)_{BUCK}}} = \\ &= \frac{0,5 \cdot (17,01 \cdot 10^{-6} + 2,99 \cdot 10^{-6})}{8 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 125 \mu F. \end{aligned} \quad (37)$$

Vzhľadom na výpočet sa zvolí hodnota kondenzátora  $C12$  220  $\mu F$ .

Minimálna hodnota indukčnosti cievky  $L_{min_{BUCK}}$  sa dopočíta zo vzťahu:

$$\begin{aligned} L_{min_{BUCK}} &= \left( \frac{U_{IN(min)} - U_{sat} - U_{OUT6,7_{BUCK}}}{I_{PK(switch)_{BUCK}}} \right) \cdot t_{on_{BUCK}} = \\ &= \left( \frac{9 - 1 - 6,7}{0,5} \right) \cdot 17,01 \cdot 10^{-6} = 44,23 \mu H. \end{aligned} \quad (38)$$

V obvode sa použije cievka  $L2$  s indukčnosťou 56  $\mu H$ . Odpor  $R20$  medzi vývodmi  $V_{cc}$  a  $I_{pk}$  (odpovedá rezistoru  $R_{SC}$ ) na obrázku 19 sa vypočíta s použitím prúdu  $I'_{PK(switch)_{BUCK}}$ , vychádzajúceho z minimálnej indukčnosti  $L_{min_{BUCK}}$ , pri napätí na vstupe  $U_{IN_{BUCK}} = 11$  V nasledujúco:

$$\begin{aligned} I'_{PK(switch)_{BUCK}} &= \left( \frac{U_{IN_{BUCK}} - U_{sat} - U_{OUT6,7_{BUCK}}}{L_{min_{BUCK}}} \right) \cdot t_{on_{BUCK}} = \\ &= \left( \frac{11 - 1 - 6,7}{44,23 \cdot 10^{-6}} \right) \cdot 17,01 \cdot 10^{-6} = 1,27 A \end{aligned} \quad (39)$$

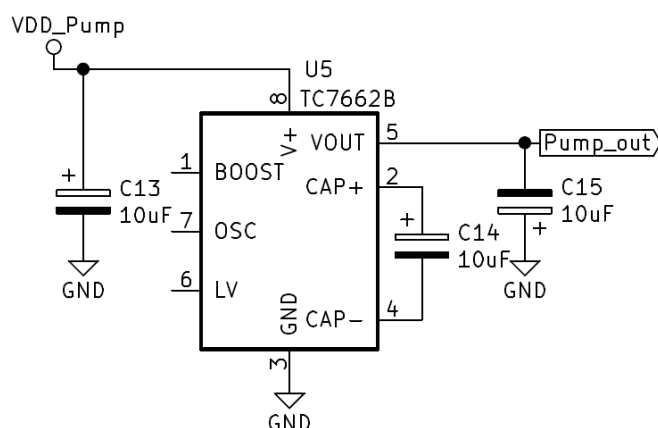
a

$$R20 = \frac{0,3}{I'_{PK(switch)_{BUCK}}} = \frac{0,3}{1,27} \cong 0,24 \Omega. \quad (40)$$

Výpočet hodnoty odporov sa počíta rovnako ako pri *boost*. Vzhľadom na to vyšli výsledné odpory 20 k $\Omega$  pre rezistory  $R21$ ,  $R22$  a  $R24$ , a odpor 5,9 k $\Omega$  pre rezistor  $R23$ .

### 2.1.7 Nábojová pumpa

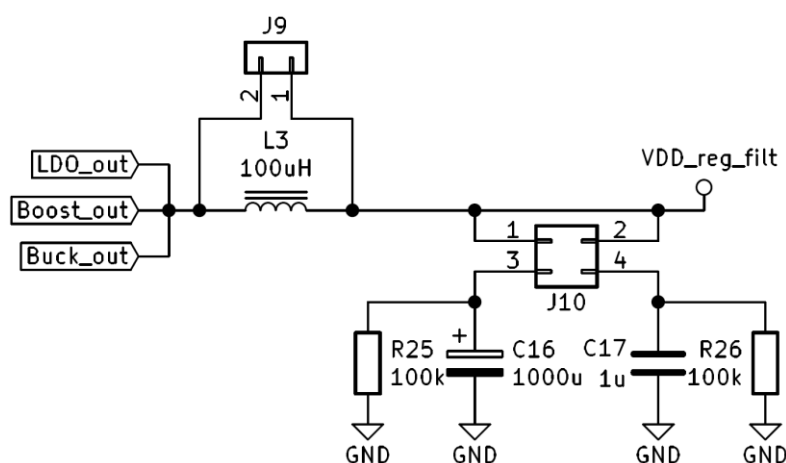
Ako jediný nenastaviteľný zdroj je v obvode nábojová pumpa. Z obrázka 20 je zjavné, že je realizovaná v zapojení invertora, aby pripravok demonštroval aj takúto možnosť konverzie dodávaného napätia. Vplyvom záporného napätia na výstupe je pumpa od ostatných meničov, respektíve stabilizátora oddelená a má vlastné filtre a záťaž, ako je možné vypozerovať z blokovej schémy na obrázku 13. Zobrazená schéma dokazuje, že zapojenie pumpy je najjednoduchšie, pretože pre svoju činnosť potrebuje iba jeden externý kondenzátor a dva blokovacie kondenzátory.



Použitá nábojová pumpa TC7662B od firmy MICROCHIP pracuje s napätím od 1,5 V do 15 V, ktoré dokáže invertovať pri výstupnom prúde maximálne 20 mA, čím spĺňa požiadavky obvodu. Zapojenie bolo vytvorené podľa katalógového listu [22]. V ňom je tiež uvedené, že v typickej aplikácii sa používa frekvencia oscilácii 10 kHz a kapacity všetkých kondenzátorov majú rovnakú hodnotu, a to 10  $\mu$ F. Ekvivalentná sériová rezistivita má vplyv na výstupnú impedanciu a zvlnenie výstupného napätia. Pumpa je však zaradená za účelom demonštrácie meniča bez indukčnosti a invertovania vstupu, preto tieto hodnoty nie sú pre danú aplikáciu podstatné a netreba na ne dávať zreteľ.

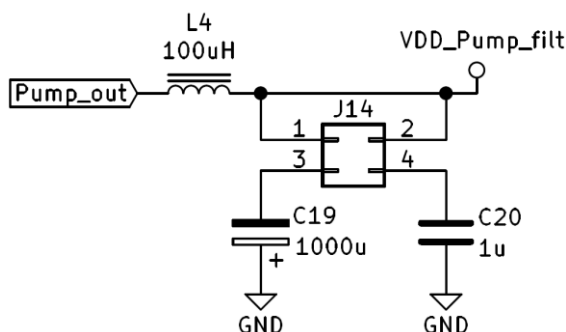
### 2.1.8 Výstupné filtre

Filtre pre pumpu a zvyšné meniče, respektíve stabilizátor obsahujú rovnaké pasívne prvky v podobnom zapojení, ale sú oddelené. V zapojení na obrázku 21, prislúchajúcom meničom a stabilizátoru, existuje osem odlišných prepojení súčiastok filtra pri použití maximálne troch prepojok. Odpor  $R_{25}$  a  $R_{26}$  zapojené paralelne ku kondenzátorom slúžia na ich rýchle vybitie po odpojení daného kondenzátora.



Filter pumpy je na obrázku 22 a nie je nutné aby bol príliš zložitý, stačí že umožňuje štyri druhy filtrácií vytvorené maximálne dvomi prepojkami. Za filtrami sa nachádza

výstup na osciloskop, na ktorom bude možné sledovať správanie signálu pri rôznych zapojeniach filtrov.

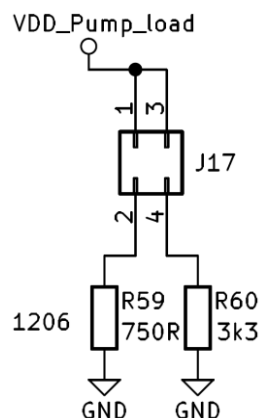


Obrázok 22 Schéma výstupných filtrov nábojovej pumpy

V obidvoch zapojeniach filtrov je použitá cievka s hodnotou  $100\ \mu\text{H}$  a kondenzátory s hodnotou  $1\ \mu\text{F}$  a  $1000\ \mu\text{F}$ . Jediný rozdiel medzi nimi je, že cievka vo filtri nábojovej pumpy je zapojená nastálo, kým v druhom filtri je jej zapojenie do obvodu voliteľné užívateľom.

### 2.1.9 Zát'aže napájacích zdrojov

Zát'až pumpy sa od zát'aže určenej pre zvyšné zdroje líši, pretože nie je nutné, aby mala toľko možností volieb, nakoľko je samotná. Zapojenie jej zát'aže je vidieť na obrázku 23, kým zapojenie zát'aže pre meniče a stabilizátora je na obrázku 24. Pri stabilizátore a indukčných meničoch sa oplatí zaradiť viacero odporov, aby sa vhodne menilo napätie a prúd ktoréhokoľvek práve pripojeného z nich. Hodnoty týchto odporov budú vzhľadom na toto vhodne navrhnuté.



Obrázok 23 Schéma zapojenia zát'aže nábojovej pumpy

Výrobca udáva maximálny výstupný prúd nábojovej pumpy  $20\ \text{mA}$  [22]. Približná maximálna hodnota napätia  $U_{OUT\_PUMP}$  na výstupe by mala byť  $-12\ \text{V}$ , táto hodnotu je vo výpočte zvolená vyššia než aká je očakávaná hodnota, aby nedošlo k poškodeniu nábojovej pumpy prúdom presahujúcim maximálny výstupný prúd.

Hodnota prúdu  $I_{R59}$  sa zvolí -16 mA, ktorá by mala obvodom prechádzať pri zapojení rezistora  $R59$  s menšou hodnotou odporu a určí sa podľa Ohmovho zákona na:

$$R59 = \frac{U_{OUT\_PUMP}}{I_{R59}} = \frac{-12}{-16 \cdot 10^{-3}} = 750 \, \Omega. \quad (41)$$

Najväčší prúd  $I_{MAX\_PUMP}$ , so zvolenou hodnotou -19,5 mA, bude obvodom prechádzať pri paralelnej kombinácii rezistorov  $R59, R60$ , označenej ako  $R_{PAR\_PUMP}$ . Prúdu  $I_{MAX\_PUMP}$  odpovedá hodnota odporu:

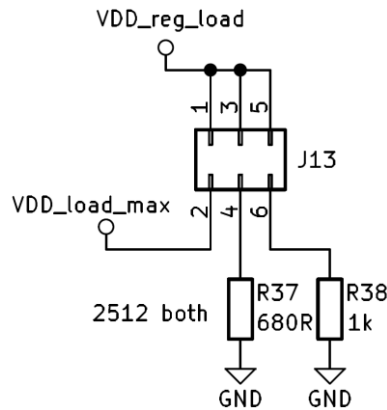
$$R_{PAR\_PUMP} = R59 || R60 = \frac{U_{OUT\_PUMP}}{I_{MAX\_PUMP}} = \frac{-12}{-19,5 \cdot 10^{-3}} \cong 615,38 \, \Omega. \quad (42)$$

Z paralelnej kombinácie odporov sa určí hodnota odporu rezistoru  $R60$  ako:

$$R60 = \frac{R59 \cdot R_1}{R59 - R_1} = \frac{750 \cdot 615,38 \cdot 10^3}{750 - 615,38 \cdot 10^3} \cong 3,3 \, k\Omega. \quad (43)$$

Použijú sa teda rezistory s odpormi 750  $\Omega$  a 3,3 k $\Omega$ .

Zaťaž meničov a stabilizátora umožňuje vybrať medzi tromi odpormi prípadne ich paralelne spojiť. Vývody lišty 1 a 2 umožňujú pripojiť rezistor, ktorý je pre každý zdroj iný a je na vývod 2 automaticky zapojený pri výbere konkrétneho zdroja. Ide o rezistor s odporom, pri ktorom by malo byť dosiahnuté najvyššie výkonové zaťaženie zdroja, ak sa k nemu paralelne zapoja rezistory  $R37$  a  $R38$ .



Obrázok 24 Schéma zapojenia záťaže LDO a meničov s indukčnosťou

Z maximálnych napätí na výstupe zdrojov a maximálnych prúdov, ktoré dodávajú sa určia individuálne odpory rezistorov. Príklad výpočtu pre odpor individuálneho rezistoru  $R30$  LDO je:

$$R30 = \frac{U_{OUT9,7\_LDO} - U_D}{I_{MAX\_LDO}} = \frac{9,7 - 0,7}{0,25} = 36 \, \Omega. \quad (44)$$

Výsledné hodnoty odporov budú vybrané z odporových rád so zaokrúhlením nahor, aby zostala bezpečná medzera pre paralelné spojenie s rezistormi  $R37$  a  $R38$ . Individuálne rezistory majú hodnoty pre LDO 39  $\Omega$ , pre *boost* 150  $\Omega$  a pre *buck* 27  $\Omega$ .

Najvyšší výkon je pri paralelnom spojení všetkých troch rezistorov. Ich výpočet vychádza zo vzťahu:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_{ind}} + \frac{1}{R_{37}} + \frac{1}{R_{38}}}, \quad (45)$$

kde  $R_{ind}$  je individuálny rezistor pre každý zdroj. Podobným spôsobom ako pri výpočte záťaže nábojovej pumpy boli vypočítané pre rezistory  $R_{37}$  a  $R_{38}$  hodnoty  $680 \Omega$  a  $1 \text{ k}\Omega$ .

S ohľadom na výkonové zaťaženie musia byť zvolené vhodné rozmery rezistorov. Príklad výpočtu výkonového zaťaženia pre individuálny odpor rezistoru  $R_{30}$  LDO sa určí pri maximálnom možnom výstupnom napätí ako:

$$P_{R_{30}} = \frac{(U_{OUT9,7LDO} - U_D)^2}{R_{30}} = \frac{(9,7 - 0,7)^2}{39} \cong 2,08 \text{ W}. \quad (46)$$

Obdobne sa vypočítajú aj maximálne výkony ostatných rezistorov, pričom sa vždy použije maximálna hodnota výstupného napätia, ktorá môže byť na daných rezistoroch. To znamená, že pre určenie maximálneho stratového výkonu spoločných záťažových rezistorov  $R_{37}$ ,  $R_{38}$  z obrázka 24 pre spínané zdroje s indukčnosťou a stabilizátor sa počíta s mnapätím  $22,7 \text{ V}$  z výstupu indukčného meniča *boost*.

Maximálne výkonové zaťaženie idnividuálneho rezistoru LDO je  $2,08 \text{ W}$ , rezistoru pri *boost* je  $4,03 \text{ W}$ , pri *boost*  $1,33 \text{ W}$ . Kvôli rezerve boli zvolené pre LDO a *boost* výkonové rezistory so stratovým výkonom  $5 \text{ W}$  a pre *buck* so stratovým výkonom  $2 \text{ W}$ . Výkonové zaťaženie rezistoru  $R_{37}$  s odporom  $680 \Omega$  je  $0,71 \text{ W}$  a  $R_{38}$  s odporom  $1 \text{ k}\Omega$   $0,48 \text{ W}$ . Obidva rezistory boli zvolené v SMD (z ang. *Surface Mount Device*) púzdre veľkosti 2512, ktorých výkonové zaťaženie je  $1 \text{ W}$ .

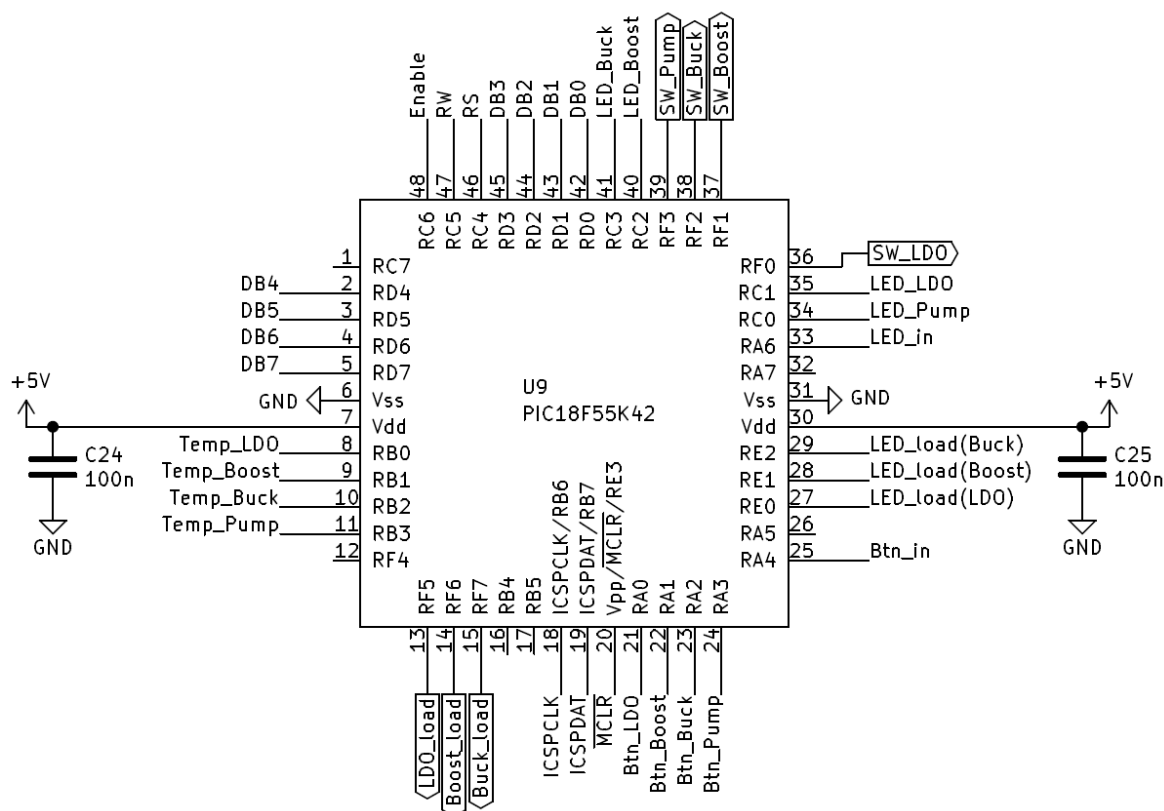
Do záťaže nábojovej pumpy bude tiecť malý prúd. Rezistorom  $R_{59}$  s hodnotou  $750 \Omega$  by mal byť vhodný na výkon aspoň  $0,3 \text{ W}$ , čomu postačí rozmer SMD rezistoru 1210 s maximálnym výkonovým zaťažením  $0,5 \text{ W}$  a rezistor  $R_{60}$  s odporom  $3,3 \text{ k}\Omega$  na výkon  $68,18 \text{ mW}$ , na ktorý je dostatočný SMD rezistor 0805 s maximálnym výkonovým zaťažením  $0,125 \text{ W}$ .

## 2.2 Riadiaca časť prípravku

Bloky v riadiacej zložke výukového prípravku zabezpečujú celkové fungovanie obvodu a ich jediný kontakt s užívateľom je prostredníctvom tlačidiel. V rámci riadiacej časti užívateľ pracuje s tlačidlami, displejom a LED diódami.

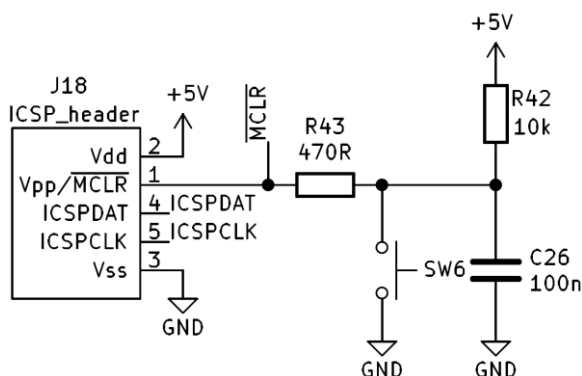
### 2.2.1 MCU a jeho napájanie

Hlavnými požiadavkami na procesor, tiež označovaný MCU (z ang. *Microprocessing Control Unit*) bol dostatočný počet vývodov, ktorých je potreba 35 na zabezpečenie spínania a ovládanie periférií, štyri na zabezpečenie napájania a tri na programovanie. Bol vybraný osembitový procesor so 48 vývodmi od firmy MICROCHIP, a to PIC18F55K42. Priradenie jednotlivých signálov k vývodom procesora je na obrázku 25. Kondenzátory pripájané k vstupu napájania by mali byť podľa odporúčania výrobcu keramické s nízkym ESR, hodnotou kapacity  $100 \text{ nF}$  a menovitým napätím  $20 \text{ V}$  [23].



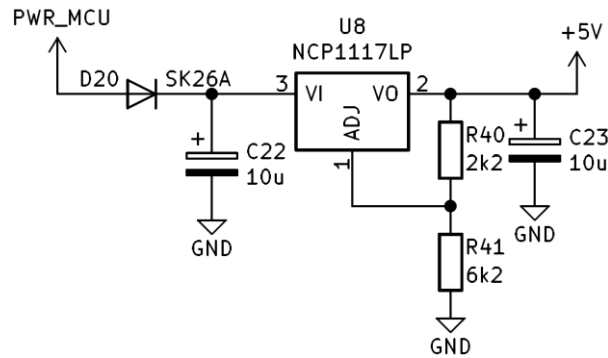
Obrázok 25 Schéma prepojenia jednotlivých vývodov MCU so signálmi

Mikroprocesor je nutné naprogramovať a na to musí byť vyvedený konektor, ktorého schéma je na obrázku 26. Zapojenie je dané odporúčaním výrobcu spolu s hodnotami odporov a kondenzátoru, ktorých hodnoty sú v schéme vypísané.



Obrázok 26 Schéma konektoru pre programovanie

Zvolený procesor je napájaný napätím 5 V, ktoré je zabezpečené rovnakým druhom lineárneho stabilizátoru ako je použité v demonštračnej časti prípravku. Zapojenie je s ním principiálne zhodné iba schéma je jednoduchšia, ako znázorňuje obrázok 27. Toto napätie sa zároveň používa na napájanie periférií procesora a na napájanie zosilňovača používaného na meranie prúdu.



Obrázok 27 Zapojenie zdroja napätia pre procesor

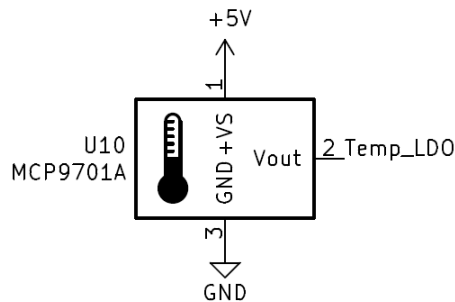
Hodnoty odporov rezistorov  $R40$  a  $R41$  sa určia rovnakým vzťahom ako v LDO vychádzajúceho zo vzťahu 11 udaného výrobcom [20]. Hodnota odporu rezistoru  $R40$ , ktorý odpovedá odporu  $R_{A\_LDO}$ , sa zvolí  $2,2\text{ k}\Omega$ . Odpor rezistoru  $R41$ , ktorý prislúcha odporu  $R_{B\_LDO}$ , sa vypočíta ako:

$$R41 = \left( \frac{U_{OUT\_MCU}}{U_{REF\_LDO}} - 1 \right) \cdot R40 = \left( \frac{5}{1,25} - 1 \right) \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 6,6\text{ k}\Omega. \quad (47)$$

Hodnota odporu rezistoru  $R41$  sa zvolí z odporovej rady ako  $6,2\text{ k}\Omega$  a výstupné napätie bude  $4,77\text{ V}$ , čo vyhovuje všetkým použitým súčiastkam.

### 2.2.2 Meranie teploty

Na meranie teploty bol zvolený integrovaný obvod MCP9701A od firmy MICROCHIP s napájacím napätím od  $3,1\text{ V}$  do  $5,5\text{ V}$ . Dokáže merať teplotu od  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , čo je dostačujúce pre účely práce. Jeho zapojenie je zobrazené na obrázku 28 [24].



Obrázok 28 Príklad prepojenia termistoru

Ide o lineárny termistor schopný meranú teplotu konvertovať na analógové napätie. Závislosť výstupného napätia  $U_{OUT\_TEMP}$  na zisťovanej teplote  $T_{A\_TEMP}$  je podľa údajov výrobcu daná ako [24]:

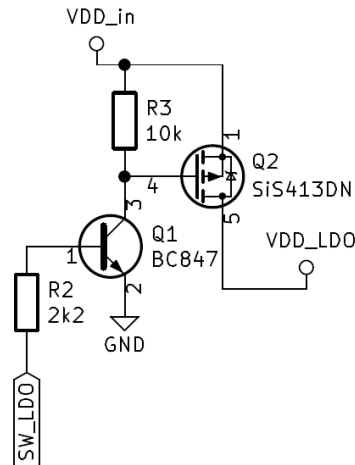
$$U_{OUT\_TEMP} = 19,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_{A\_TEMP} + 0,4\text{ [V]}. \quad (48)$$

Zvolený teplotný senzor nevyžaduje žiadne ďalšie obvodové zapojenia, pretože výstupný vývod je možné zapojiť priamo na vstup procesoru, čo je vidieť zo signálu na obrázku 28.



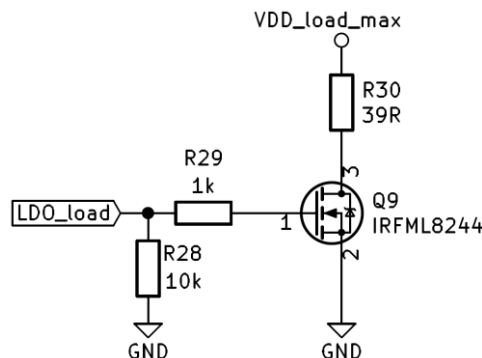
### 2.2.3 Spínanie zdrojov a zát'aže

Zvolený zdroj je do obvodu pripájaný spínačom s NPN tranzistorom BC847 od firmy NXP SEMICONDUCTORS a PMOS tranzistorom SiS413DN od firmy VISHAY znázornenými na obrázku 29. PMOS je spínaný tranzistorom NPN, pretože na zavretie potrebuje väčšie napätie než je procesor schopný dodať. Pri zopnutom NPN sa *gate* PMOS tranzistoru uzemní, čím sa tento tranzistor otvorí a pripojí sa do obvodu príslušná zát'až. Ak je NPN rozopnutý na *gate* sa dostane cez odpor v kolektore NPN rovnaké napätie, akým sa napájajú zdroje a PMOS bude mať dostatočné napätie na zatvorenie [25], [26].



Obrázok 29 Príklad zapojenia spínania vybraného zdroja

Príslušné zaťažovacie rezistory jednotlivých zdrojov sú do obvodu zapájané *high-side* spínaním NMOS tranzistorom podľa obrázka 30. Rýchlosť spínania nie je kritická a preto nie sú na odpory do *gate* počítané, ale zvolené. Na tento tranzistor neboli kladené špecifické požiadavky, vhodný bol malý odpor  $R_{DS(on)}$ , aby na ňom nevznikal veľký úbytok napätia a vzhľadom na toto bol vybratý tranzistor IRFML8244 od firmy INFINEON [27].



Obrázok 30 Spínanie rezistorov patriacich k jednotlivým zdrojom

R28 zapojený na zem zabezpečuje uzemnenie *gate* v stave nečinnosti. Je zaradený pred rezistorom R29, aby s ním netvoril delič. R29 slúži pre obmedzenie špičkového prúdu. Ak MCU nastaví napríklad vývod LDO\_Load do logickej jednotky tranzistor sa zopne, začne ním prechádzať prúd a rezistor zapojený na *drain* sa uzemní.

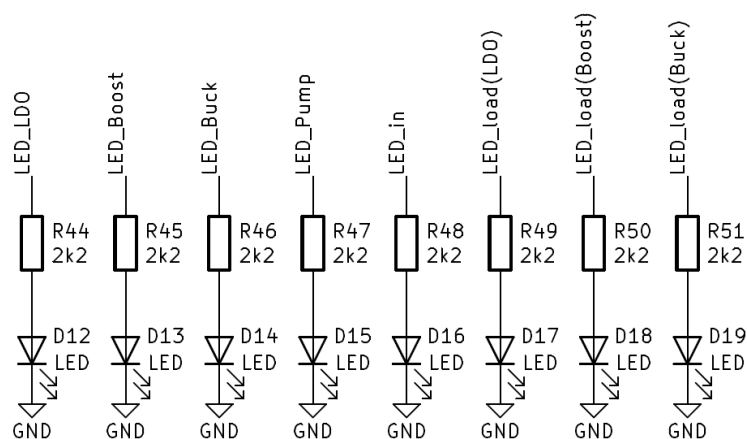
## 2.2.4 Užívateľské rozhranie

Do užívateľského rozhrania patria tlačidlá, ktorými sa vyberá zdroj a zapája sa do obvodu, LED diódy, ktoré informujú o aktuálne vybranom zdroji s jemu prislúchajúcou záťažou a displej, ktorý vypisuje vybraný zdroj a teplotu na ňom.

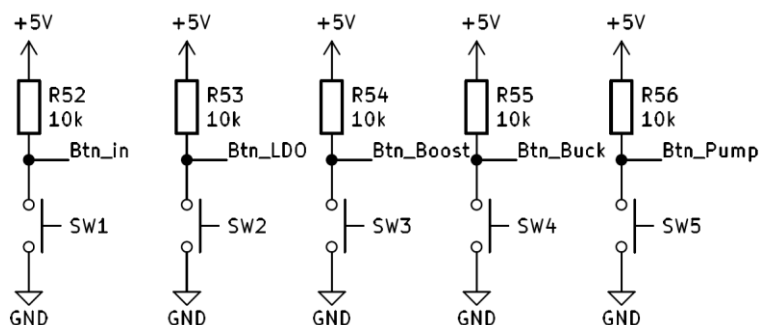
Každý zdroj má vlastné tlačidlo, ktorým sa zapína, respektíve vypína a zároveň sa pri tom rozsvetujú, respektíve zhasínajú LED diódy prislúchajúce danému zdroju s jeho záťažou. Miernu výnimku predstavuje pumpa, ktorej sa nepripája záťaž a preto sa pri nej pracuje iba s jednou diódou.

Nie je možné vybrať viac zdrojov naraz, pretože sa predchádzajúci vybraný zdroj vždy nahradí novým. Samostatným tlačidlom bude vybraný zdroj pripojený k zvyšku obvodu, pri čom sa rozsvieti príslušná dióda.

Môžu byť použité ľubovoľné tlačidlá montované na dosku plošných spojov a diódy. Zvolené diódy sú zelené LED diódy od firmy KP-2012LSGC. Prúd diódami predstavuje približne 1,5 mA, pri ktorom je svietivosť 400  $\mu$ cd [28]. Príklad zapojenia diód a tlačidiel je na obrázku 31 a 32.

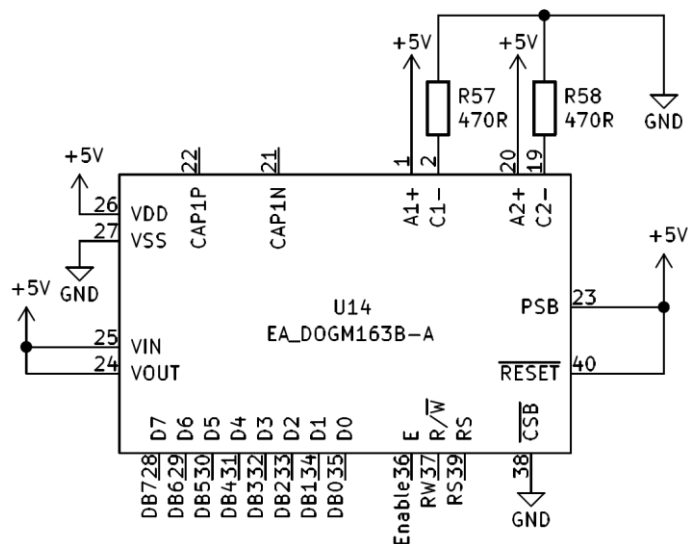


Obrázok 31 Zapojenie LED diód



Obrázok 32 Zapojenie tlačidiel

Pre vizualizáciu bude alfanumerický 16x3 LCD (z ang. *Liquid Crystal Display*) displej EA dogm163B-A s modrým pozadím od firmy ELECTRONIC ASSEMBLY, ktorého zapojenie v obvodu je na obrázku 33.



Obrázok 33 Zapojenie displeja

Displej umožňuje reguláciu kontrastu softvérovo. Podsvietenie je potrebné pre dobrú čitateľnosť zobrazovaných znakov. Výrobca uvádza, že úbytok na diódach je 2,8 V [29]. Vzhľadom na to sa v zapojení podsvietenia uplatnia rezistory *R57* a *R58* s hodnotami odporov 470  $\Omega$ , pri ktorých diódami potečie prúd necelých 5 mA, čo je dostatočná hodnota na adekvátne podsvietenie.

Na riadenie displeja je použitý radič ST7036, ktorý umožňuje komunikáciu po 8-bitovej, 4-bitovej alebo sériovej SPI zbernici. Pre účely prípravku bola zvolená 8-bitová paralelná zbernica pre prenos dát, prípadne príkazov. Pomocou vývodov RS a R/W je možné softvérovo nastaviť či má displej dáta vypísať, alebo má vykonať príkaz. Vývod *Enable* umožňuje spustenie displeja [30].

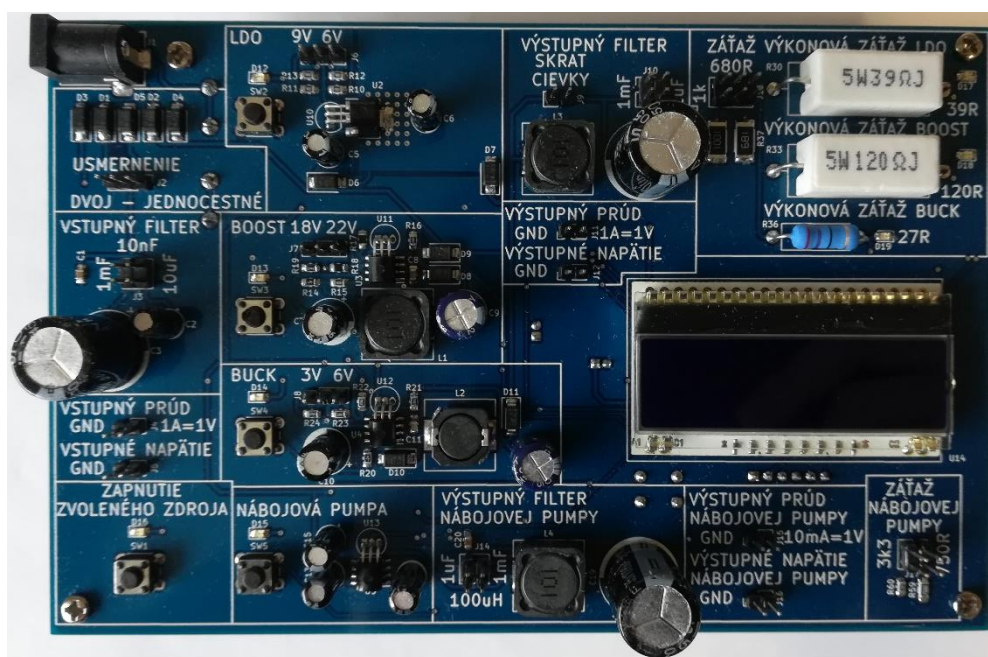
### 3. REALIZÁCIA A OŽIVENIE PRÍPRAVKU

V tejto časti bakalárskej práce je popísaný návrh DPS (doska plošných spojov), spôsob jej realizácie a oživenie všetkých častí. V rámci tejto časti práce došlo k vytvoreniu programu a otestovaniu funkčnosti jednotlivých blokov.

#### 3.1 Realizácia a výroba DPS

Celkový schematický návrh sa nachádza v prílohe A.1, A.2 a A.3. Bol realizovaný na dvojvrstvovej DPS pomocou programu KiCad 5.1.4. Motív navrhutej dosky z hornej strany (*top*) a zo spodnej strany (*bottom*) sa nachádza v prílohe B.1 a B.2. V prílohe B.3 sa nachádza motív servisnej potlače hornej strany prípravku. Vytvorený súbor s návrhom sa nachádza v elektronickej prílohe k práci.

Horná strana dosky obsahuje časti s ktorými užívateľ pracuje a je vidieť na obrázku 34. Súčiastky jednotlivých blokov sa nachádzajú pri sebe aby bola DPS prehľadná. Medzi rôznymi možnosťami zapojení si užívateľ vyberá pomocou prepajok umiestňovaných na kolíkové lišty a zdroje si volí pomocou tlačidiel. Vývody na meranie prúdu a napätia sú realizované pomocou kolíkových lišt, pri ktorých je servisnou potlačou jasne označená zem aby nedošlo k poškodeniu osciloskopu spôsobeného nesprávnym zapojením.



Obrázok 34 Horná strana prípravku s napájacími zdrojmi

Pomocou servisnej potlače sú oddelené bloky a je popísaná ich funkcia. V blokoch sa nachádzajú popísané možnosti všetkých volieb, aby sa sprehľadnila práca s prípravkom. Celková servisná potlač z hornej strany je vidieť na obrázku 34.

Na spodnej strane dosky sa nachádza riadiaca časť obsahujúca napájanie procesora, jeho periférii, procesor, tlačidlo na reštart, vývody na programovanie, spínanie zdrojov, spínanie záťaží a obvody na meranie prúdu. Nachádza sa tu aj poistka, ktorá je upevnená v držiaku a je ľahko prístupná aby sa dala v prípade potreby jednoducho vymeniť.

Všetky použité kolíkové lišty majú rozstup vývodov 2,54 mm. Použité sú prevažne SMD súčiastky. SMD rezistory a kondenzátory majú rozmery 0805 až na výnimky, kedy je potrebný väčší rozmer rezistorov kvôli ich výkonovému zaťaženiu. Individuálne zaťažovacie rezistory jednotlivých zdrojov sú zvolené výkonové.

Pri návrhu LDO bolo potrebné zabezpečiť dostatočný odvod tepla. Použitie chladiča by zaberali veľa priestoru, doska by nemusela byť dobre vyvážená a zapojenie by bolo menej prehľadné. Vzhľadom na to bola zväčšená plocha pri vývode na odvod tepla a použilo sa niekoľko prekovov, aby došlo k dostatočnému chladeniu.

Teplotný senzor je použitý v púzde TO-92. Vývody senzoru boli zohnuté a plochou stranou pripevnené na všetky integrované obvody LDO, zvyšujúceho aj znižujúceho meniča s indukčnosťou a nábojovú pumpu. Senzor sa teda na doske nachádza celkovo štyrikrát ako je vidieť na obrázku 34.

Navrhnutá doska dosahuje rozmery 167 mm na dĺžku a 108 mm na šírku. Bola vyrobená firmou JLCPCB. Výsledný prípravok bol ručne osadený a zospájkovaný.

## 3.2 Oživenie a testovanie prípravku

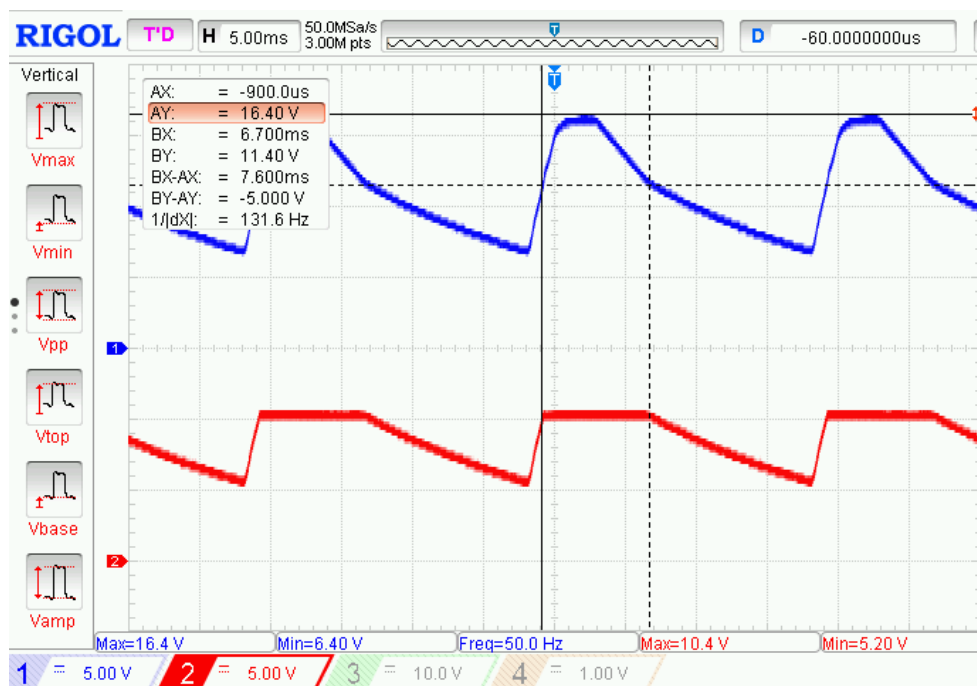
Táto podkapitola sa venuje oživeniu jednotlivých zdrojov a naprogramovaniu prípravku. Keďže každý zdroj má veľké množstvo kombinácií vstupných filtrov, výstupných filtrov a záťaží, nachádzajú sa tu výstupy z osciloskopu iba tých z nich, ktoré reprezentujú funkčnosť daného zapojenia najlepšie aj napriek overeniu väčšiny z kombinácií.

Pri každom zdroji je uvedený jeden priebeh vstupného, výstupného napätia pri jednocestnom usmernení, kedy nie sú splnené prevádzkové podmienky, pretože vstupný signál je výrazne zvlnený. Tie sú splnené pri zapojení Graetzovho mostíka na vstup testovaných zdrojov. Pri každom zdroji sa nachádza priebeh napätí na vstupe a výstupe aj pri maximálnej záťaži.

### 3.2.1 Oživenie LDO

V prípade LDO bolo pri jednocestnom usmernení nastavené výstupné napätie 9 V. Do obvodu nebol pripojený vstupný ani výstupný filter a záťaž predstavoval rezistor s odporom 1 k $\Omega$ , pri ktorom bol zo stabilizátora odoberaný prúd 9 mA. Priebeh napätia na vstupe a výstupe prípravku je vidieť na obrázku 35.

Priebeh vstupného napätia (modrá z obrázku 35) nebol optimálny a klesal aj pod požadovanú hodnotu výstupného napätia, pretože do obvodu bol zapojený jednocestný usmerňovač. Zvlnenie 10 V na vstupe spôsobilo výrazné zvlnenie výstupného napätia (červená), a to 5,2 V.



Obrázok 35 Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia LDO pri jednocestnom usmernení vstupu, výstupnom napätí stabilizátora 9 V, žiadnom filtri a minimálnej záťaži 1 k $\Omega$

Z priebehu signálov na obrázku 35 je možné zistiť hodnotu úbytku na regulačnom prvku a overiť tak, či naozaj ide o nízkoúbytkový stabilizátor. Pomocou kurzorov bola odčítaná hodnota napätia na vstupe (modrá) 11,4 V, pri ktorej LDO prestalo stabilizovať výstup (červená). Stabilizované napätie na výstupe LDO dosahovalo 10,4 V. Po odčítaní stabilizovaného výstupného napätia od zmeraného vstupného napätia je zjavné, že LDO dokáže stabilizovať výstupné napätie pri rozdiely vstupu a výstupu 1 V.

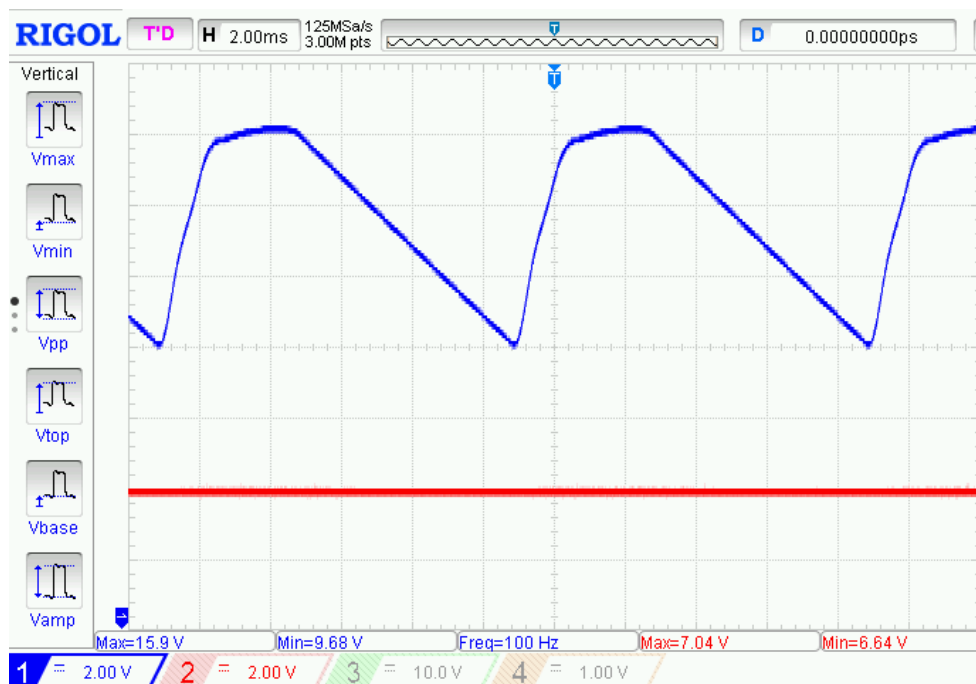
Prevádzkové podmienky stabilizátora boli splnené zapojením dvojcestného usmernenia. Obrázok 36 demonštruje priebeh vstupného a výstupného napätia pri tomto usmernení, kedy je výstupné napätie 9 V, vstupný aj výstupný filter plne zapojený a stabilizátor je naplno zaťažený. Maximálna záťaž v tomto prípade predstavuje paralelnú kombináciu rezistorov  $R_{30}$ ,  $R_{37}$  a  $R_{38}$ , ktorých hodnoty sú 39  $\Omega$ , 680  $\Omega$  a 1 k $\Omega$ . Výsledná hodnota zaťažovacieho odporu predstavuje približne 35,6  $\Omega$ , pri ktorej záťaž odoberá prúd 253 mA.

Vstupné napätie (modrá z obrázku 36) malo vďaka dvojcestnému usmerneniu a zapojením vstupným filtrom menšie zvlnenie dosahujúce 2,1 V, čo umožnilo spolu so zapojeným výstupným filtrom priateľne stabilizovať výstup (červená) LDO.



Obrázok 36 Priebek vstupného (modrý pribeh) a výstupného (červený pribeh) napätia LDO pri dvojcestnom usmernení, napätí na výstupe 9 V, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži

Dvojcestné usmernenie je prezentované aj obrázkom 37, v ktorom je zobrazené vstupné a výstupné napätie zapojené bez filtrov, s výstupným napätím 6 V. Zátťaž predstavovala paralelná kombinácia rezistorov s hodnotami odporov  $680\ \Omega$  a  $1\ \text{k}\Omega$  s odberom 14,8 mA.



Obrázok 37 Priebek vstupného (modrý pribeh) a výstupného (červený pribeh) napätia LDO pri dvojcestnom usmernení, napätí na výstupe 6 V, bez zapojeného vstupného aj výstupného filtra, paralelnej kombinácii  $680\ \Omega$  a  $1\ \text{k}\Omega$  v záťaži

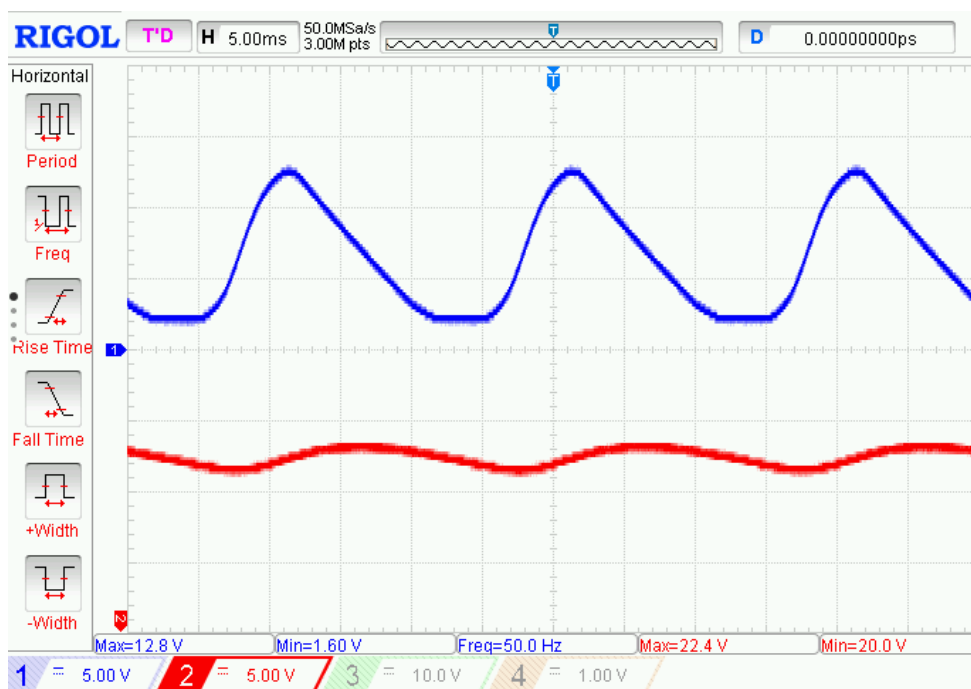
V prípade z obrázku 37 bol výstup (červená) vhodne stabilizovaný. Na túto stabilizáciu bolo dostačujúce zapojenie s dvojcestným usmernením bez zapojenia filtrov, kedy zvlnenie na vstupe (modrá) predstavovalo 6,2.

Z obrázku 35 je zjavné, že LDO nedokázalo stabilizovať výstup prijateľne pri jednocestnom usmernení. Pri dvojcestnom usmernení bol výstup dostatočne stabilizovaný pri maximálnej záťaži (obrázok 36), keď boli zapojené vstupné aj výstupné filtre. Pri menšej záťaži bolo LDO schopné stabilizovať výstup aj bez zapojenia akéhokoľvek filtračného prvku (obrázok 37).

### 3.2.2 Oživenie indukčného meniča *boost*

Výstup meniča *boost* so zapojeným jednocestným usmerňovačom na vstupe bol testovaný pri výstupnom napätí 22 V, maximálnej záťaži a plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri. Maximálna záťaž je paralelná kombinácia rezistorov s hodnotami 120  $\Omega$ , 680  $\Omega$  a 1 k $\Omega$ , čo predstavuje približne 92,6  $\Omega$ . Pri tejto záťaži bol odoberaný prúd necelých 238 mA. Vstupné a výstupné napätie takto testovaného meniča je vykreslené na obrázku 38.

Zvlnenie vstupného napätia (modrý priebeh na obrázku 38) bolo pri jednocestnom usmernení výrazné aj napriek zapojenému vstupnému filteru a dosahovalo 11,2 V. Takéto zvlnenie na vstupe vyústilo v zvlnení výstupu (červená) s hodnotou 2,4 V pri plne zapojenom výstupnom filteri.



Obrázok 38 Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia *boost* pri zapojenom výstupe 22 V, jednocestnom usmernení, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filteri a maximálnej záťaži

Ustálený výstup meniča *boost* je prezentovaný obrázkom 39. Boli použité rovnaké kombinácie filtrov a záťaže ako na obrázku 38, čiže maximálne zapojený vstupný filter, výstupný filter, maximálna záťaž s odoberaným prúdom 238 mA a výstup meniča



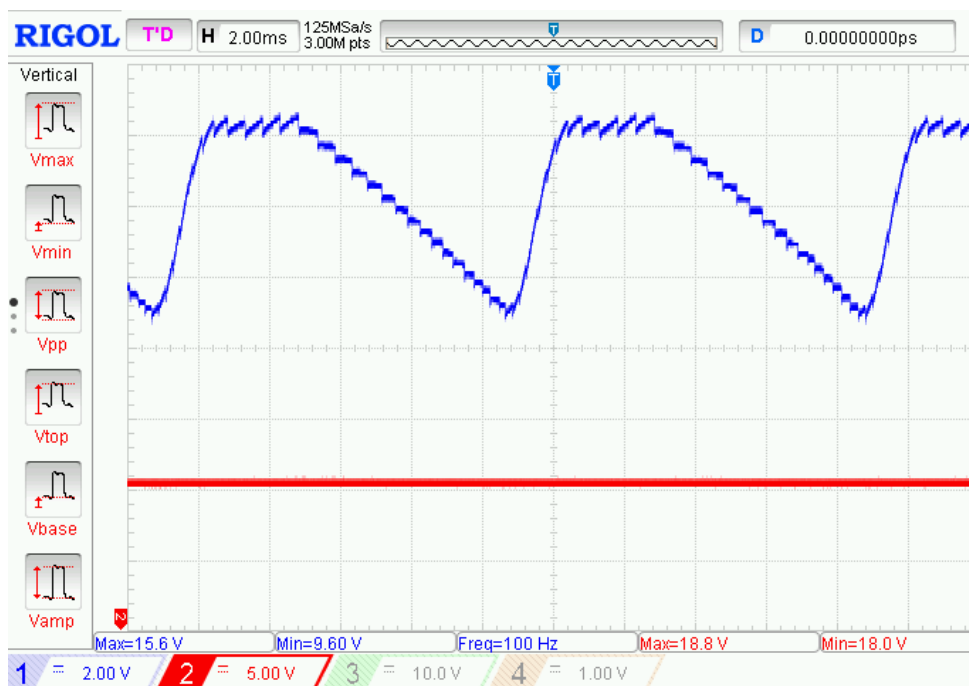
bol nastavený na 22 V. Jediným rozdielom bolo usmernenie Graetzovým mostíkom namiesto jednocestného usmernenia.



Obrázok 39 Pribeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia *boost* pri zapojenom výstupe 22 V, dvojcestnom usmernení, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži

Rovnako ako v zapojení LDO, aj v zapojení meniča *boost* bolo jednocestné usmernenie nedostačujúce na nastavenie ustáleného výstupného napätia (obrázok 38). Pri rovnakej kombinácii parametrov zdroja, s rozdielom zapojenia Graetzovho mostíka na vstup (modrá), kleslo jeho zvlnenie z 11,2 V zo zapojenia s jednocestným usmerňovačom (obrázok 38) na 3,1 V v zapojení s Graetzovým mostíkom (obrázok 39). Dvojcestné usmernenie umožnilo stabilizáciu výstupu (červený priebeh na obrázku 39). Toto dokazuje, že jednocestné usmernenie nespĺňa prevádzkové podmienky pre daný prípravok.

Obrázok 40 znázorňuje ako stabilizuje indukčný menič *boost* pri menšej záťaži, a to paralelnej kombinácii rezistorov s hodnotami odporov 680  $\Omega$  a 1 k $\Omega$ , ktorá predstavuje výslednú hodnotu odporu 404,8  $\Omega$ . Prúdový odber záťaže vtedy dosahoval približne 44,5 mA. V zapojení bol použitý dvojcestný usmerňovač, vstupný signál nebol filtrovaný a na výstupný signál mal maximálne zapojený filter. Takto zvolené zapojenie bolo testované pri výstupnom napätí z meniča 18 V.



Obrázok 40 Priebek vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia *boost* pri zapojenom výstupe 18 V, žiadnom vstupnom filtri, plne zapojenom výstupnom filtri a záťaži 405  $\Omega$

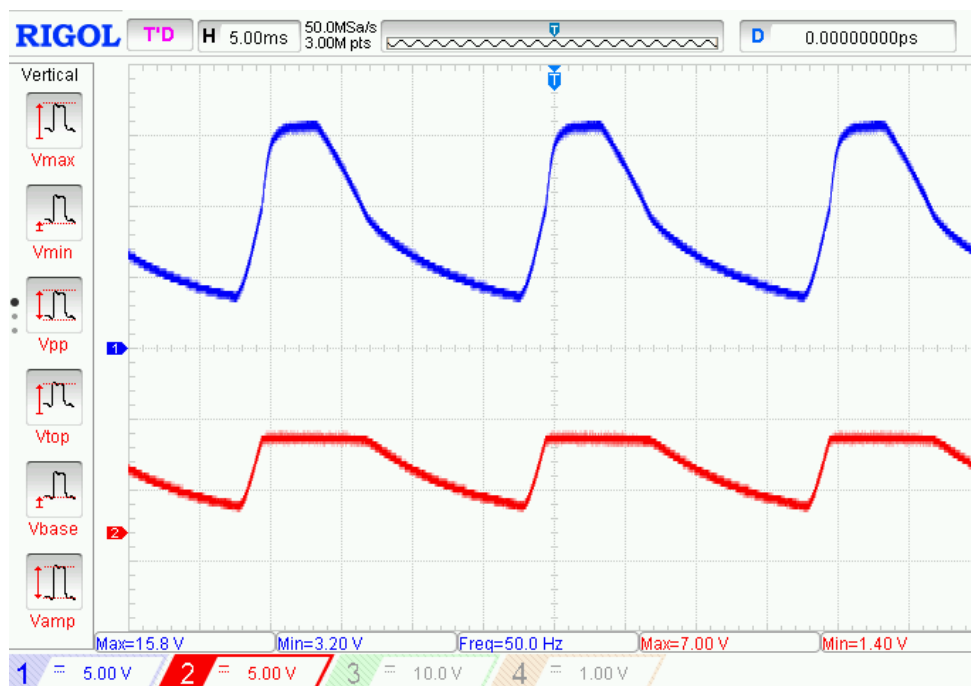
*Boost* stabilizoval aj pri menšej záťaži s minimálnym zvlnením výstupu, hoci zvlnenie vstupu nadobudlo hodnotu 6 V. Na obrázku 40 je možné vidieť malé zákmity s vysokou frekvenciou na vstupnom priebehu. Tento jav je spôsobený spínaním cievky a použitím filtrácie je možné ho čiastočne potlačiť, ako je možné vypožorovať z obrázkov 38 a 39.

### 3.2.3 Oživenie indukčného meniča *buck*

Maximálne výstupné napätie nastaviteľné na indukčnom meniči *buck* je 6 V. Najväčšia možná záťaž je paralelná kombinácia rezistorov s hodnotami 27  $\Omega$ , 680  $\Omega$  a 1 k $\Omega$ , ktorej výsledná hodnota dosahuje približne 25,3  $\Omega$ . Vstupné a výstupné napätia bez zapojených filtrov pri jednocestnom usmernení vstupu sú znázornené na obrázku 41.

Vstupné napätie (modrá z obrázku 41) nespĺňa optimálne prevádzkové podmienky, čo sa prejavuje zvlneným výstupom (červená). Zvlnenie vstupu činí 12,6 V a výstupu 5,6 V. Pomocou filtrov je možné zmienený priebeh výstupného napätia ustáliť.

Obrázok 42 reprezentuje stabilizáciu výstupného napätia pri rovnakej kombinácii usmernenia, výstupného napätia a záťaže ako v prípade na obrázku 41, a to jednocestnom usmernení vstupu, výstupnom napätí 6 V a maximálnej záťaži, ktorou prechádza prúd 237 mA. Odlišnosťou bol plne zapojený vstupný aj výstupný filter, vďaka ktorému kleslo zvlnenie na vstupe na hodnotu 2,8 V a výstup sa ustálil.

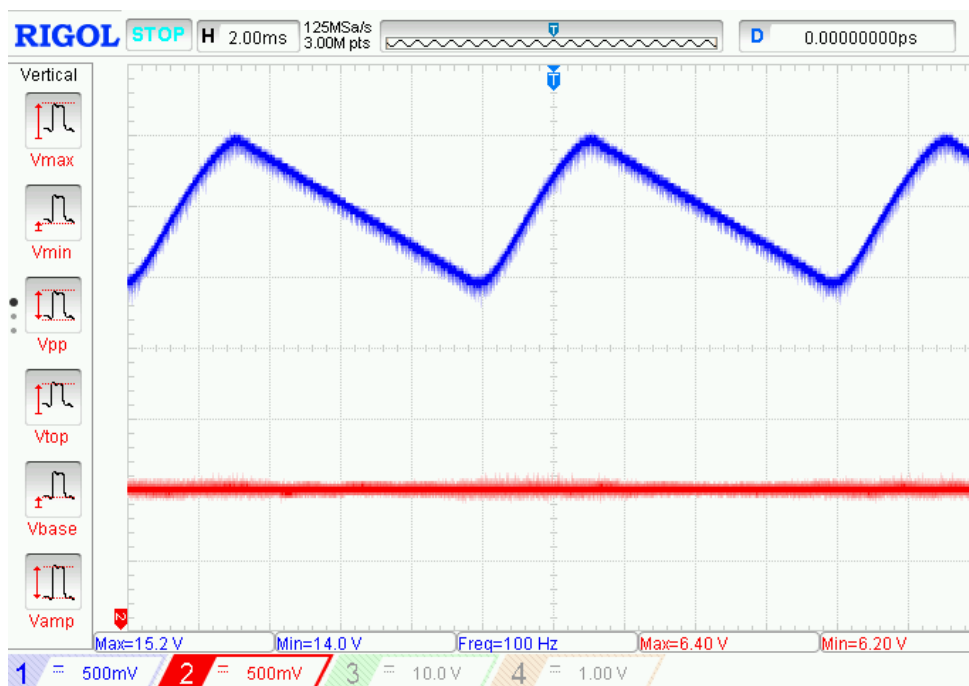


Obrázok 41 Priebek vstupného (modrý priebek) a výstupného (červený priebek) napätia *buck* pri zapojenom výstupe 6 V, jednocestnom usmernení, žiadnom filtri a maximálnej záťaži



Obrázok 42 Priebek vstupného (modrý priebek) a výstupného (červený priebek) napätia *buck* pri zapojenom výstupe 6 V, jednocestnom usmernení, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži

S Graetzovým mostíkom na vstupe, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri dosiahlo zvlnenie vstupného napätia, ako znázorňuje obrázok 43, 1,2 V a výstupné napätie sa stabilizovalo. Na výstupe bolo pri testovaní meniča nastavené napätie 6 V a bol maximálne zaťažený s prúdovým odberom 237 mA.



Obrázok 43 Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia *buck* pri zapojenom výstupe 6 V, dvojcestnom usmernení, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži

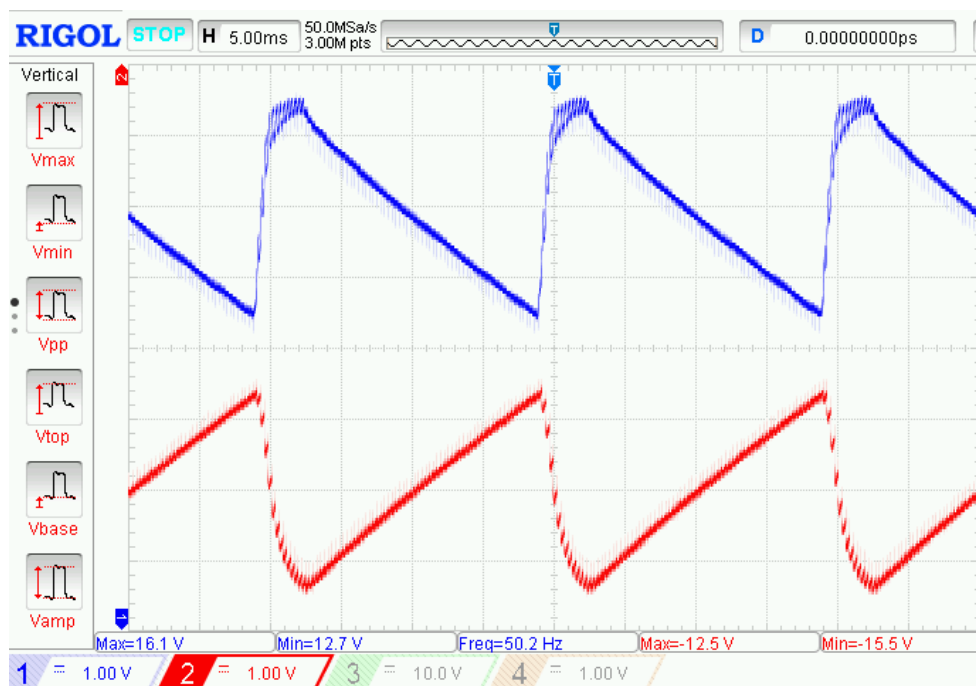
Indukčný menič *buck* rovnako ako *boost* mal výstupný signál ovplyvnený spínaním. Zákymity zo spínania cievky prenikajú aj na vstup, čo je možné vidieť na obrázkoch 41, 42 aj 43. Tento nežiadúci jav je prirodzenou súčasťou všetkých spínaných zdrojov a je možné ho potlačiť vhodnou filtráciou, nie je však možné ho odstrániť úplne.

### 3.2.4 Oživenie nábojovej pumpy

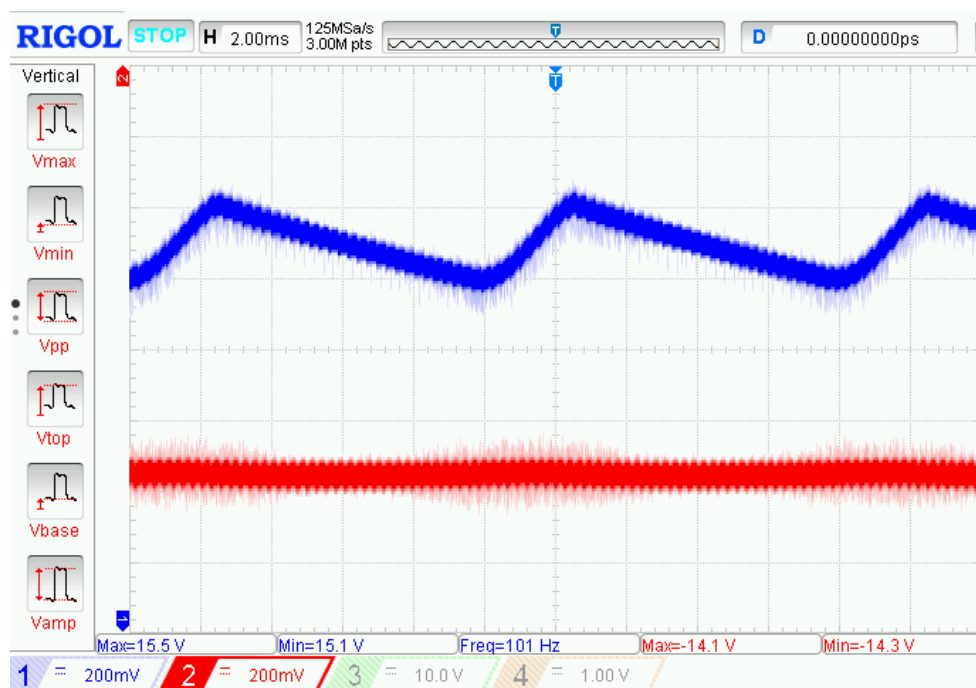
Keďže nábojová pumpa je zapojená ako invertor, jej výstup kopíruje priebeh signálu zo vstupu ale so zápornou hodnotou. Priebehy na obrázku 44 ukazujú vstupné a výstupné napätie nábojovej pumpy pri jednocestnom usmernení, bez zapojenia akéhokoľvek filtra a záťaži 3,3 k $\Omega$ . Odoberaný prúd bol maximálne 4,7 mA. Z obrázku 44 je zjavné, že výstupné napätie správne invertuje vstupné, pričom sa pohybuje medzi hodnotami napätia -12,5 V a -15,5 V.

Zapojením Graetzovho mostíka na vstup a použitím plného filtra bolo možné dosiahnuť ustálenie výstupu, čo znázorňuje obrázok 45. Obvod bol v tomto prípade skúšaný pri maximálnom zaťažení, čo je paralelná kombinácia rezistorov s hodnotami odporov 3,3 k $\Omega$  a 750  $\Omega$ . Výsledná hodnota maximálnej záťaže je približne 611,1  $\Omega$ . Záťaž odoberala prúd hodnoty 23,4 mA. Pri vyššie zmienenej kombinácii parametrov nábojovej pumpy dosiahol výstup zvlnenie 200 mV.

Rovnako ako pri spínaných zdrojoch s indukčnosťou aj pri spínaných zdrojoch bez indukčnosti vznikajú rušivé signály spôsobené spínaním, v tomto prípade spínaním kondenzátora. Tento jav je pozorovateľný na obrázkoch 44 a 45.



Obrázok 44 Priebek vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia nábojovej pumpy s jednocestným usmernením vstupu, bez vstupného filtra, výstupného filtra a záťaži 3,3 k $\Omega$



Obrázok 45 Priebek vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia nábojovej pumpy pri dvojcestnom usmernení vstupu, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži

Nakoľko výstupné napätie invertuje priebeh vstupného napätia, je dostatočujúce aby bol ustálený vstupný signál a výstupný signál už nemusí byť filtrovaný. Demonštráciu takéhoto zapojenia predstavujú priebehy na obrázku 46. Do obvodu

bol pripojený Graetzov mostík, vstupný filter a záťaž  $750\ \Omega$  s prechádzajúcim prúdom 22 mA.



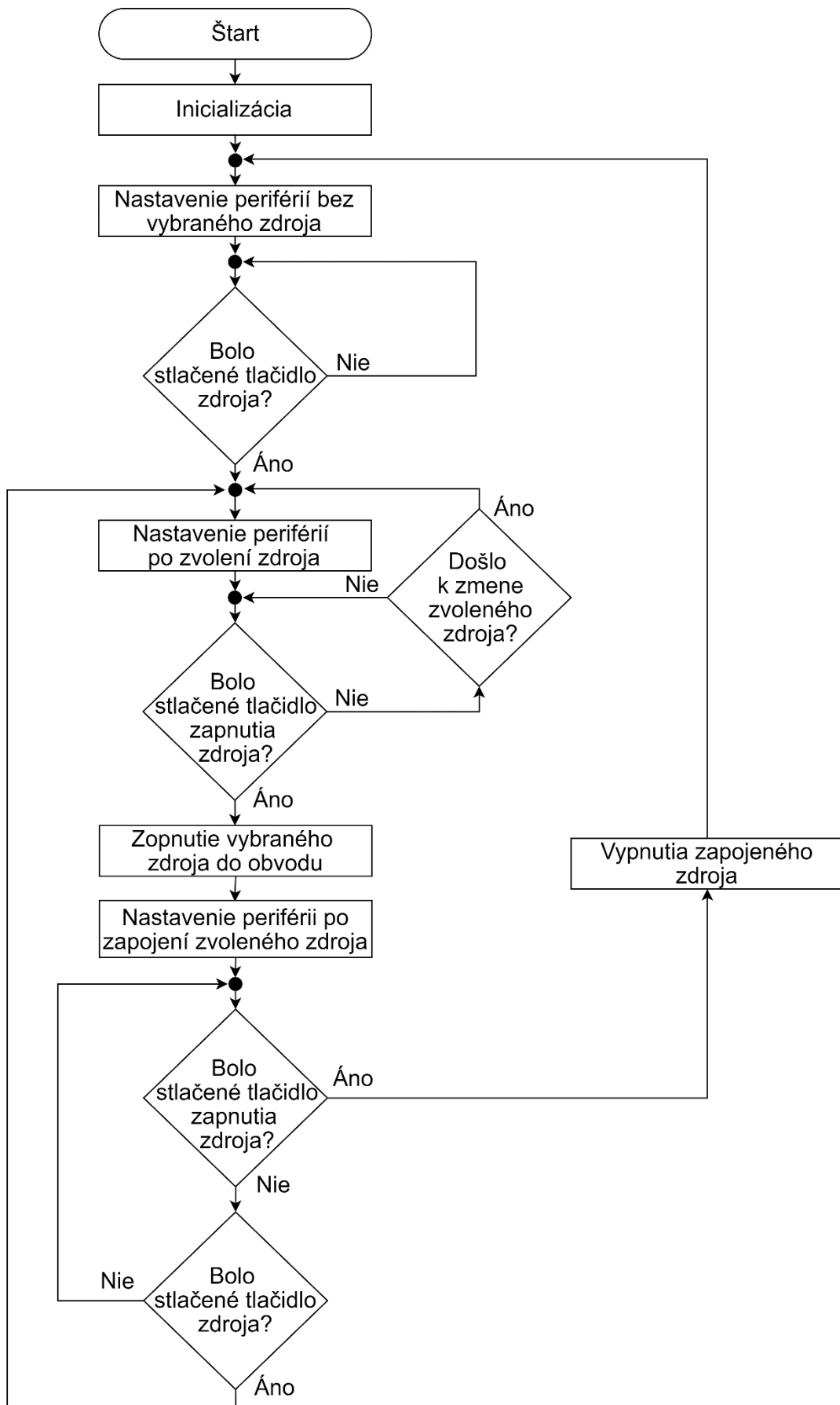
Obrázok 46 Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia nábojovej pumpy pri dvojcestnom usmernení vstupu, plne zapojenom vstupnom filtri, nezapojenom výstupnom filtri a záťaži  $750\ \Omega$

Zo zobrazených priebehov na obrázkoch 44, 45 a 46 je vidieť, že inverzia vstupného napätia fungovala správne. Menšia hodnota výstupného napätia v absolútnej hodnote (z 16,1 V zo vstupu na  $-15,5\ \text{V}$  na výstupe) na obrázku 44 bola spôsobená technologickým obmedzením súčiastky.

### 3.3 Programové vybavenie

Ovládací program bol napísaný v jazyku C s využitím programu MPLAB X IDE v5.30 a skompilovaný kompilátorom XC-8 v2.20. K hlavnému programu boli vytvorené dve knižnice, a to knižnica displeja a knižnica zhŕňajúca príkazy k hlavnému programu. Vytvorený ovládací program sa nachádza v elektronickej prílohe k práci.

Vývojový diagram programu sa nachádza na obrázku 47. Pod blokom nastavenia periférií sa myslí zhasnutie a rozsvietenie príslušných LED diód, meranie teploty a aktualizácia obrazovky displeja s aktuálnym stavom práce. Tlačidlo zdroja predstavuje ktorékoľvek zo štyroch tlačidiel pri zdrojoch, ktorými sa volí príslušný zdroj. Tlačidlom zapnutia zdroja sa zopne zvolený zdroj do obvodu a opätovným stlačením sa odpojí.



Obrázok 47 Vývojový diagram



Po pripojení napájania dochádza k inicializácii procesora, nastaveniu vývodov, inicializácii časovača procesora, AD prevodníku (ADC, z ang. *Analog to Digital Converter*) a displeja. Prípravok sa nastaví do počiatočného stavu (nastavenie periférií bez vybraného zdroja), kedy nie je zvolený ani zapnutý do obvodu žiadny zdroj. Počiatočná obrazovka displeja, kedy je na ňom vypísané oznámenie „ZVOL ZDROJ“, je znázornená na obrázku 48.



Obrázok 48 Počiatočná obrazovka displeja

Program ďalej kontroluje či nedošlo k stlačeniu niektorého z tlačidiel pri zdrojoch. Ak došlo, pri zdroji a jeho individuálnej záťaži, ktorému tlačidlo prislúcha, sa rozsvieti LED dióda. V prípade tlačidla pri nábojovej pumpke sa rozsvieti dióda iba pri nej, pretože nemá individuálnu záťaž. Toto predstavuje nastavenie periférií po zvolení zdroja z vývojového diagramu.

Vzhľad displeja po tomto kroku je znázornený na obrázku 49. Zobrazí sa nápis „ZAPNI ZDROJ“, do riadku pod ním sa vypíše zvolený zdroj a hodnota jeho individuálneho rezistoru, v prípade nábojovej pumpy iba jej názov. Tretí riadok ukazuje teplotu zvoleného zdroja spracovávanú mikrop procesorom pomocou AD prevodníku. Teplota je aktualizovaná každú sekundu.



Obrázok 49 Obrazovka displeja po zvolení zdroja

Ak sa v tomto bode programu stlačí tlačidlo pri inom zdroji (došlo k zmene zvoleného zdroja), zmení sa nastavenie zvoleného zdroja na nový a zapnú sa LED diódy pri ňom. Displej sa aktualizuje a v druhom riadku bude zobrazený nový zdroj s jeho individuálnou záťažou. Začne sa merať teplota na novozvolenom zdroji a táto sa vypíše každú sekundu na displej.



Stlačením tlačidla „ZAPOJENIE ZVOLENÉHO ZDROJA“ sa vybraný zdroj zopne spolu s jeho individuálnou záťažou, v prípade zvolenej nábojovej pumpy sa zopne iba ona. Ide o krok zopnutie vybraného zdroja do obvodu z vývojového diagramu a nasleduje nastavenie periférie po zapojení zvoleného zdroja, kedy pri tlačidle zasvieti indikačná LED dióda a na prvom riadku displeja sa zobrazí nápis „ZAPNUTÝ ZDROJ“, ako je vidieť na obrázku 50. Vtedy je možné merať výstupné napätie a prúd.



Obrázok 50 Obrazovka displeja po zapojení zvoleného zdroja do obvodu

Pri druhom stlačení tlačidla „ZAPOJENIE ZVOLENÉHO ZDROJA“ sa zapnutý zdroj odpojí, odpojí sa jeho záťaž a prípravok sa vráti do počiatočného stavu pri zapojení napájania, kedy nesvieti ani žiadna indikačná LED dióda. Na displeji sa zobrazí jeho počiatočná obrazovka z obrázka 48.

Pokiaľ je do obvodu zapojený niektorý zo zdrojov je možné ho vypnúť aj pomocou stlačenia ľubovoľného tlačidla pri inom zdroji. V takom prípade sa dovedy zapnutý zdroj odpojí, LED dióda indikujúca zapojenie do obvodu sa vypne spolu s diódami pri vypínanom zdroji a jeho záťaži. Namiesto nich sa zapnú diódy pri novom zdroji, ktorý sa zároveň vypíše na displej do podoby z obrázku 49 a meria sa jeho teplota.

## 4. NÁVRH LABORATÓRNEJ ÚLOHY

### Vlastnosti napájacích zdrojov

#### Obsah úlohy:

Praktické overenie vlastností lineárneho stabilizátora, zvyšujúceho meniča s indukčnosťou (*boost*), znižujúceho meniča s indukčnosťou (*buck*) a nábojovej pumpy na výukovom prípravku.

#### Zadanie:

Prezrite si bloky všetkých zdrojov na prípravku a vyhodnoťte zložitosť ich návrhu.

Porovnajte schopnosť regulácie a zašumenia výstupného napätia všetkých zdrojov.

Porovnajte výstup LDO a *buck* pri napätí 6 V, pri rovnako nastavených záťažiach a filtroch (zvoľte ľubovoľne, zahrňte aj maximálne zaťaženie).

Pri maximálnom napätí a záťaži jednotlivých zdrojov určite ich výkonové zaťaženie. Pomocou teploty jednotlivých zdrojov porovnajte zdroje podľa ich účinnosti.

#### Postup:

1. Zvoľte si druh usmernenia vstupného signálu pomocou prepajky v časti „USMERNENIE“.
2. Testovaný napájací zdroj zvoľte tlačidlom a prepajkou nastavte požadované napätie na jeho výstupe. Zdroj do obvodu pripojíte tlačidlom v časti „ZAPNUTIE ZVOLENÉHO ZDROJA“.
3. Na osciloskope sledujte vstupné a výstupné signály, na displeji si všímajte teplotu jednotlivých zdrojov. Sledujte výstup pri zapojení naprázdno a pri rôznych kombináciách záťaží, uistite sa, že ste zaťažili zdroj aj na maximálny možný výkon. Pri tom ľubovoľne meňte vstupný a výstupný filter.
4. Všímajte si teplotu zdroja pri maximálnej záťaži, správanie výstupu zdroja pri stave naprázdno a pri záťažiacich (schopnosť stabilizácie, veľkosť zašumenia výstupu), vplyv jednotlivých filtrov na výstupné napätie a prúd.
5. Postup opakujte pre obidva spôsoby usmernenia a všetky zdroje.

Pozn. 1. Pri výbere druhého zdroja stačí stlačiť tlačidlo pri danom zdroji, predchádzajúci zdroj sa automaticky od obvodu odpojí. Nový zdroj sa do obvodu zapojí opäť tlačidlom „ZAPNUTIE ZVOLENÉHO ZDROJA“.

Pozn. 2. Výstupné časti nad displejom prislúchajú LDO, *boost* a *buck*. Výstupné časti pod displejom prislúchajú iba nábojovej pumpe.

#### Záver:

Vyhodnoťte úlohy zo zadania, vyhodnoťte vplyv usmernenia, filtrov a veľkosti záťaže na výstupný signál, schopnosť stabilizácie zdrojov, porovnajte výhody a nevýhody jednotlivých zdrojov.

# ZÁVER

V rámci bakalárskej práce bol spracovaný návrh a realizácia laboratórneho prípravku s rôznymi druhmi napájacích zdrojov. Úlohou bolo vytvoriť fungujúci prípravok s ukážkou viacerých napájacích zdrojov, ktorým bude možné meniť vstupné a výstupné parametre. Malo byť umožnené sledovať vplyv týchto zmien na výstup signálu, merať prúd a napätie pomocou osciloskopu, merať teplotu jednotlivých zdrojov. Súčasťou práce malo byť vytvorenie návrhu laboratórnej úlohy s využitím navrhnutého prípravku.

V úvodnej časti bakalárskej práce sa nachádza rozbor teórie ohľadom napájacích zdrojov. Je tu popísané delenie zdrojov s hlbším zameraním na lineárny stabilizátor, zvyšujúci menič s indukčnosťou, znižujúci menič s indukčnosťou a menič s kapacitou. Koniec prvej kapitoly pojednáva o spôsobe filtrácie a usporiadaní filtrov vhodných pre napájacie zdroje.

Druhá kapitola práce je zameraná na návrh laboratórneho prípravku. Obsahuje podrobný popis jednotlivých blokov práce, pričom je rozdelená na časť prípravku so zdrojmi a riadiacu časť. Začiatok každej podkapitoly je venovaný všeobecným vlastnostiam a požiadavkám navrhovanej súčasti, ku ktorej je vždy priložená schéma zapojenia. Nasleduje konkrétny popis zvolených súčiastok vrátane požiadaviek na ne a v prípade napájacích zdrojov podrobné výpočty potrebné na ich návrh.

Realizáciou prípravku, jeho oživením a meraním sa zaoberá ďalšia časť práce, a to kapitola 3. Nachádza sa tu popis návrhu dosky plošných spojov, spôsob jej výroby a výsledný vzhľad laboratórneho prípravku (obrázok 34). Oživenie prípravku zhrňa spôsob fungovania všetkých navrhnutých zdrojov v podobe merania ich výstupného signálu pri rôznych zapojeniach a vyhodnotenie ich funkčnosti. Na konci kapitoly je popísaný spôsob fungovania programu a spôsob práce s prípravkom z užívateľského hľadiska.

Záver práce sa venuje návrhu laboratórnej úlohy s využitím navrhnutého prípravku. Ide o príklad zadania úlohy na laboratórne cvičenie, ktorý by mohol byť poskytnutý študentom na uľahčenie práce s prípravkom. Obsahuje body a zadania, na ktoré je vhodné sa zamerať pri práci s prípravkom, aby mohol študent využiť jeho plný potenciál.

Navrhnutý prípravok obsahuje štyri druhy zdrojov, ktorými sú lineárny stabilizátor, spínaný zdroj bez indukčnosti, spínané zdroje s indukčnosťou v zapojení zvyšujúceho a znižujúceho meniča. Pre svoje fungovanie potrebuje adaptér a niekoľko prepojek, aby mohol užívateľ pracovať s rôznymi spôsobmi usmernenia, rozličnými kombináciami vstupných a výstupných filtrov, ľubovoľnými záťažami, či výberom konkrétnej hodnoty výstupného napätia. Vstupné ako aj výstupné napätie a prúd je možné zároveň sledovať na osciloskope.

Všetky požiadavky práce boli splnené. Vytvorená doska plošných spojov je plne a správne funkčná, umožňuje spínanie zdrojov, pričom nie je možné aby sa zopol viac ako jeden zdroj naraz. Umožňuje meranie vstupných signálov, výstupných signálov a zmenu obvodoých parametrov. Spínanie je zabezpečené softvérovou, automaticky sa meria teplota a na displeji sa zobrazujú potrebné informácie. Celý prípravok je doplnený prehľadnou servisnou potlačou, ktorá uľahčuje orientáciu spolu s indikačnými LED diódami pri všetkých tlačidlách.

Využitie práce má význam najmä vo výuke, v ktorej by si študenti mohli overiť svoje teoretické poznatky o zdrojoch, prípadne ďalšie nadobudnúť. Vďaka prístupu

k parametrom zdroja môžu vyskúšať rôzne kombinácie zapojení a vyhodnotiť výhody, nevýhody jednotlivých zdrojov, zložitosť ich návrhu a porovnať ich vlastnosti.

Výsledkom práce je teda užitočný prípravok, ktorý uľahčí nie len výučbu vyučujúcim, ale študentom poskytne praktickú ukážku, vďaka ktorej môžu lepšie pochopiť zadanú problematiku.

# ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] BROWN, Marty. *Power Supply Cookbook* [online]. 2nd Edition. NEWNES, 2001 [cit. 2019-12-10]. ISBN 9780080480121. Dostupné z: [http://index-of.co.uk/Tutorials-2/Power%20Supply%20Cookbook%20-%202nd%20Edition%20-%20By%20Marty%20Brown%20\(Newnes%20-%202001\)%20278pp.pdf](http://index-of.co.uk/Tutorials-2/Power%20Supply%20Cookbook%20-%202nd%20Edition%20-%20By%20Marty%20Brown%20(Newnes%20-%202001)%20278pp.pdf)
- [2] BAŘINA, Jaromír, Pavel BRINDL a Ivo VLK. *Elektronika* [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/653>
- [3] BAŘINA, Jaromír, Pavel BRINDL a Ivo VLK. *Elektronika* [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/656>
- [4] KARDOŠ, MILAN. *Návrh napájecieho zdroja vysieláča* [online]. Žilina, 2006 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://diplom.utc.sk/wan/665.pdf>. ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE. Vedoucí práce Doc. Ing. Rudolf Hronec PhD.
- [5] BAŘINA, Jaromír, Pavel BRINDL a Ivo VLK. *Elektronika* [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/657>
- [6] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I : Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů*. Praha: BEN, 1997. ISBN 80-86056-02-3.
- [7] *Linear and Switching Voltage Regulator Fundamentals* [online]. National Semiconductor, 2011 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snva558/snva558.pdf>
- [8] *Introduction to linear voltage regulators* [online]. Maker.io [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/maker/blogs/introduction-to-linear-voltage-regulators>
- [9] *Lin. stabilizátory: Co by měl každý vývojář vědět o PSRR?* [online]. HW server, 2011 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/lin-stabilizatory-co-by-mel-kazdy-vyvojar-vedet-o-psrr.html>
- [10] *LDO Basics* [online]. Texas Instruments, 2019 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ml/slyy151a/slyy151a.pdf>
- [11] BAŘINA, Jaromír, Pave BRINDL a Ivo VLK. *Elektronika* [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/664>
- [12] HOROWITZ, Paul a Winfield HILL. *The art of electronics*. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-0-521-80926-9.
- [13] HUMLHANS, Jan. *Nábojové pumpy : funkce, přehled a použití*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-046-6.
- [14] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 80-7300-045-8.
- [15] *Comparing regulated charge-pump and inductor-based DC/DC converters* [online]. eetimes, 2006 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.eetimes.com/comparing-regulated-charge-pump-and-inductor-based-dc-dc-converters/#>
- [16] *Output Noise Filtering for DC/DC Power Modules* [online]. Texas Instruments, 2019 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snva871/snva871.pdf>

- [17] 2A, 20V - 150V Surface Mount Schottky Barrier Rectifiers [online]. Taiwan Semiconductor [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2357944.pdf>
- [18] Current-Shunt Monitors, Voltage Output, Bidirectional, Zero-Drift, Low- or High-Side Current Sensing [online]. ON SEMICONDUCTOR, 2018 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NCS199A1R-D.PDF>
- [19] WW12R, WW08R, WW06R [online]. WALSHIN, 2014 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/Document/29aba0df853caafb34dcf64e28af3804/ASC\\_WW06-08-12R.pdf](https://www.tme.eu/Document/29aba0df853caafb34dcf64e28af3804/ASC_WW06-08-12R.pdf)
- [20] 1.0 A Low-Dropout Positive Fixed and Adjustable Voltage Regulators [online]. ON SEMICONDUCTOR, 2014 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1878386.pdf>
- [21] DC-DC converter control circuits [online]. STMicroelectronics, 2013 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1723944.pdf>
- [22] CHARGE PUMP DC-TO-DC VOLTAGE CONVERTER [online]. Microchip Technology [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: [http://www.farnell.com/datasheets/2124910.pdf?\\_ga=7459074.1810805776.1575507463-1244502421.1573386833&\\_gac=1.229322408.1574858215.EA1aIQobChMirqmwgrSK5gI Vw-F3Ch1AmwjcEAAAYASAAEgKH1fD\\_BwE](http://www.farnell.com/datasheets/2124910.pdf?_ga=7459074.1810805776.1575507463-1244502421.1573386833&_gac=1.229322408.1574858215.EA1aIQobChMirqmwgrSK5gI Vw-F3Ch1AmwjcEAAAYASAAEgKH1fD_BwE)
- [23] 28/40/44/48-Pin, Low-Power High-Performance Microcontrollers with XLP Technology [online]. Microchip Technology [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC18LF26-27-45-46-47-55-56-57K42-Data-Sheet-40001919E.pdf>
- [24] Low-Power Linear Active Thermistor™ ICs [online]. Microchip Technology [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2124381.pdf>
- [25] BC847 series 45 V, 100 mA NPN general-purpose transistors [online]. NXP Semiconductors, 2014 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1856333.pdf>
- [26] P-Channel 30 V (D-S) MOSFET [online]. VISHAY, 2013 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2148605.pdf>
- [27] IRFML8244TRPbF [online]. INFINEON [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1911843.pdf>
- [28] 2.0x1.25mm SMD CHIP LED LAMP [online]. KINGBRIGHT, 2010 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: [http://www.farnell.com/datasheets/1854080.pdf?\\_ga=2.268823029.546267682.1591124270-1244502421.1573386833](http://www.farnell.com/datasheets/1854080.pdf?_ga=2.268823029.546267682.1591124270-1244502421.1573386833)
- [29] DOG SERIES 3.3V [online]. ELECTRONIC ASSEMBLY, 2012 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/4a84a7a5b14a7b21285e4453a3089fea/EA%20DOGM081B-A.pdf>
- [30] ST7036 Dot Matrix LCD Controller/Driver [online]. Sitronix Technology Corporation, 2003 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.lcd-module.de/eng/pdf/zubehoer/st7036.pdf>

# ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

DC	Direct Current	Jednosmerný prúd
PWM	Pulse Width Modulation	Pulzná šírková modulácia
RC		Dolnopriepustný filter s rezistorom a kondenzátorom
LC		Dolnopriepustný filter s cievkou a kondenzátorom
PSRR	<i>Power Supply Ripple Rejection</i>	Potlačenia zvlnenia napájacieho zdroja
LDO	<i>Low Dropout Regulator</i>	Nízkoúbytkový stabilizátor
NMOS	<i>N-channel Metal Oxid Semiconductor</i>	Unipolárny tranzistor s N kanálom
PMOS	<i>P-channel Metal Oxid Semiconductor</i>	Unipolárny tranzistor s P kanálom
DP		Dolná priepusť
HP		Horná priepusť
PP		Pásmová priepusť
PZ		Pásmová zádrž
LED	<i>Light Emittinig Diode</i>	Elektroluminiscenčná dióda
AC	<i>Alteranting Current</i>	Striedavý prúd
GND	<i>Ground</i>	Nulový potenciál
IN–	<i>Negative Input</i>	Záporný vstup zosilňovača
VO	Voltage Output	Napät'ový výstup
ADJ	<i>Adjust</i>	Vývod <i>adjust</i> LDO
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i>	Ekvivalentný sériový odpor
CII	<i>Comparator Inverting Input</i>	Invertujúci vstup komparátoru
Vcc	<i>Voltage Supply</i>	Vývod na napájacie napätie v <i>boost</i> a <i>buck</i>
Ipk	<i>Current Limit Sense</i>	Vývod vrcholového prúdu v <i>boost</i> a <i>buck</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>	Súčiastky pre povrchovú montáž
MCU	<i>Microprocessing Control Unit</i>	Mikroprocesor
NPN		Bipolárny tranzistor NPN
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>	Displej z tekutých kryštálov
DPS		Doska plošných spojov
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>	Prevodník analógovej úrovne na digitálnu

# ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV

$U_{DO}$	[V]	Úbytok napätia na regulačnom prvku
$R_{DS}$	[ $\Omega$ ]	Výstupný odpor tranzistoru MOSFET
$U_{GS}$	[V]	Vstupné napätie tranzistoru MOSFET
$I_z$	[A]	Prúd záťažou
$I_{peak}$	[A]	Špičkový prúd nábojových púmp
$f_M$	[Hz]	Medzná frekvencia
$L$	[H]	Indukčnosť cievky
$C$	[F]	Kapacita kondenzátora
$X_L$	[ $\Omega$ ]	Reaktancia cievky
$X_C$	[ $\Omega$ ]	Reaktancia kondenzátoru
$\omega$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	Uhlová frekvencia
$f$	[Hz]	Frekvencia signálu
$R$	[ $\Omega$ ]	Odpor rezistoru
$U_{VDD}$	[V]	Napätie po usmernení
$U_{in}$	[V]	Vstupné napätie z adaptéra
$U_d$	[V]	Priepustné napätie diódy
$R_{SHUNT}$	[ $\Omega$ ]	Odpor snímacieho rezistoru pri meraní prúdu
$U_{OUT\_AMP}$	[V]	Výstupné napätie zosilňovača na meranie prúdu
$I_{RSHUNT}$	[A]	Prúd prechádzajúci snímacím rezistorom
$A_U$	[-], [dB]	Napät'ové zosilnenie zosilňovača na meranie prúdu
$U_{REF\_AMP}$	[V]	Referenčné napätie zosilňovača na meranie prúdu
$U_{OUT\_LDO}$	[V]	Výstupné napätie LDO
$U_{REF\_LDO}$	[V]	Referenčné napätie LDO
$R_{B\_LDO}$	[ $\Omega$ ]	Odpor rezistora nastavujúceho výstupné napätie LDO
$R_{A\_LDO}$	[V]	Odpor rezistoru s referenčným napätím v LDO
$I_{ADJ}$	[A]	Prúd prechádzajúci vývodom ADJ v LDO
$P_{MAX\_LDO}$	[W]	Maximálny stratový výkon LDO
$U_{OUT6,7\_LDO}$	[V]	Výstupné napätie LDO 6,7 V
$I_{MAX\_LDO}$	[A]	Maximálny prúd z LDO
$R_{B6,7\_LDO}$	[ $\Omega$ ]	Odpor paralelnej kombinácie rezistorov nastavujúcich výstupné napätie LDO na 6,7 V
$R_{B9,7\_LDO}$	[ $\Omega$ ]	Odpor paralelnej kombinácie rezistorov nastavujúcich výstupné napätie LDO na 9,7 V
$U_{OUT9,7\_LDO}$	[V]	Výstupné napätie LDO 9,7 V
$U_{OUT\_BOOST}$	[V]	Výstupné napätie <i>boost</i>
$R_{A\_BOOST}$	[ $\Omega$ ]	Odpor rezistoru s referenčným napätím v <i>boost</i>
$R_{B\_BOOST}$	[ $\Omega$ ]	Odpor rezistora nastavujúceho výstupné napätie <i>boost</i>



$U_{OUT22,7\_BOOST}$	[V]	Výstupné napätie <i>boost</i> 22,7 V
$U_{IN(min)}$	[V]	Minimálne predpokladané vstupné napätie <i>boost</i> a <i>buck</i>
$t_{on\_BOOST}$	[s]	Doba zopnutia tranzistoru v <i>boost</i>
$t_{off\_BOOST}$	[s]	Doba rozopnutia tranzistoru v <i>boost</i>
$U_{sat}$	[V]	Saturačné napätie na spínacom prvku v <i>boost</i> a <i>buck</i>
$f_{min}$	[Hz]	Minimálna frekvencia v <i>boost</i> a <i>buck</i>
$C_T$	[F]	Kapacita časovacieho kondenzátora v <i>boost</i> a <i>buck</i>
$I_{MAX\_BOOST}$	[A]	Maximálny výstupný prúd <i>boost</i>
$I_{PK( switch )\_BOOST}$	[A]	Špičkový prúd spínača v <i>boost</i>
$U_{ripple(p-p)\_BOOST}$	[V]	Zvlnenie výstupného napätia v <i>boost</i>
$C_O$	[F]	Kapacitu výstupného kondenzátora v <i>boost</i> a <i>buck</i>
$L_{min\_BOOST}$	[H]	Minimálna indukčnosť cievky v <i>boost</i>
$R_{SC}$	[Ω]	Odpor rezistoru obmedzujúceho prúd v <i>boost</i> a <i>buck</i>
$I'_{PK( switch )\_BOOST}$	[A]	Špičkový prúd spínača, vychádzajúci z $L_{min\_BOOST}$
$U_{IN\_BOOST}$	[V]	Napätie na vstupe <i>boost</i>
$R_{A22,7\_BOOST}$	[Ω]	Odpor paralelnej kombinácie rezistorov nastavujúcich výstupné napätie <i>boost</i> na 22,7 V
$R_{A18,7\_BOOST}$	[Ω]	Odpor paralelnej kombinácie rezistorov nastavujúcich výstupné napätie <i>boost</i> na 18,7 V
$U_{OUT18,7\_BOOST}$	[V]	Výstupné napätie <i>boost</i> 18,7 V
$R_{driver}$	[Ω]	Odpor kolektoru vnútorného tranzistoru v <i>boost</i>
$B_F$	[-]	Nútené zosilnenie tranzistoru
$U_{OUT6,7\_BUCK}$	[V]	Výstupné napätie <i>buck</i> 6,7 V
$t_{on\_BUCK}$	[s]	Doba zopnutia tranzistoru v <i>buck</i>
$t_{off\_BUCK}$	[s]	Doba rozopnutia tranzistoru v <i>buck</i>
$I_{MAX\_BUCK}$	[A]	Maximálny výstupný prúd <i>buck</i>
$I_{PK( switch )\_BUCK}$	[A]	Špičkový prúd spínača v <i>buck</i>
$U_{ripple(p-p)\_BUCK}$	[V]	Zvlnenie výstupného napätia v <i>buck</i>
$L_{min\_BUCK}$	[H]	Minimálna indukčnosť cievky v <i>buck</i>
$I'_{PK( switch )\_BUCK}$	[A]	Špičkový prúd spínača, vychádzajúci z $L_{min\_BUCK}$
$U_{IN\_BUCK}$	[V]	Napätie na vstupe <i>buck</i>
$U_{OUT\_PUMP}$	[V]	Výstupné napätie nábojovej pumpy
$I_{R59}$	[A]	Prúd zaťažovacím rezistorom R59 nábojovej pumpy
$I_{MAX\_PUMP}$	[A]	Maximálny výstupný prúd nábojovej pumpy
$R_{PAR\_PUMP}$	[Ω]	Odpor paralelnej kombinácie rezistorov v záťaži nábojovej pumpy
$R_{ind}$	[Ω]	Odpor individuálneho rezistoru
$P_{R30}$	[W]	Výkonové zaťaženie individuálneho rezistoru R30
$U_{OUT\_MCU}$	[V]	Výstupné napätie MCU
$U_{OUT\_TEMP}$	[V]	Výstupné napätie teplotného senzoru

$T_{A\_TEMP}$	[°C]	Teplota snímaná teplotným senzorom
$R_{DS(on)}$	[Ω]	Výstupný odpor zopnutého tranzistoru MOSFET

# ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1	Bloková schéma lineárneho napájacieho zdroja, prebraná z [4] .....	2
Obrázok 2	Schematický diagram bežného lineárneho regulátoru, prebrané z [7]....	4
Obrázok 3	a) PMOS LDO b) NMOS LDO, prevzaté z [10] .....	5
Obrázok 4	Bloková schéma spínaného napájacieho zdroja so znázornenými tvarmi priebehov signálov medzi jednotlivými blokmi .....	7
Obrázok 5	Zapojenie nábojovej pumpy ako invertor napätia, prevzaté z [13].....	8
Obrázok 6	Zapojenie nábojovej pumpy ako zdvojovač napätia, prevzaté z [13].....	9
Obrázok 7	Zapojenie nábojovej pumpy ako delič napätia, prevzaté z [13] .....	9
Obrázok 8	Zapojenie znižujúceho meniča pri zopnutom spínači (hore) a rozpnutom spínači (dole), prevzaté z [14].....	10
Obrázok 9	Zapojenie zvyšujúceho meniča pri zopnutom spínači (hore) a rozpnutom spínači (dole), prevzaté z [14].....	11
Obrázok 10	Zapojenie invertujúceho meniča pri zopnutom spínači (hore) a rozpnutom spínači (dole), prevzaté z [14] .....	11
Obrázok 11	Spôsoby realizácie dolnej priepusti prvého stupňa LR (vľavo), RC (vpravo).....	14
Obrázok 12	Realizácia dolnej priepusti druhého stupňa LC .....	15
Obrázok 13	Kompletná blokovaná schéma výukového prípravku so zdrojmi .....	16
Obrázok 14	Schéma usmerňovacej časti obvodu .....	17
Obrázok 15	Schéma vyhladzovacích vstupných filtrov .....	18
Obrázok 16	Schéma zapojenia na meranie napätia a prúdu na vstupe zdrojov.....	19
Obrázok 17	Schéma zapojenia LDO .....	21
Obrázok 18	Schéma zapojenia meniča s indukčnosťou ako <i>boost</i> .....	22
Obrázok 19	Schéma zapojenia meniča s indukčnosťou ako <i>buck</i> .....	25
Obrázok 20	Schéma zapojenia nábojovej pumpy.....	27
Obrázok 21	Schéma výstupných filtrov .....	27
Obrázok 22	Schéma výstupných filtrov nábojovej pumpy .....	28
Obrázok 23	Schéma zapojenia záťaže nábojovej pumpy .....	28
Obrázok 24	Schéma zapojenia záťaže LDO a meničov s indukčnosťou .....	29
Obrázok 25	Schéma prepojenia jednotlivých vývodov MCU so signálmi .....	31
Obrázok 26	Schéma konektoru pre programovanie .....	31
Obrázok 27	Zapojenie zdroja napätia pre procesor .....	32
Obrázok 28	Príklad prepojenia termistoru.....	32
Obrázok 29	Príklad zapojenia spínania vybraného zdroja .....	33
Obrázok 30	Spínanie rezistorov patriacich k jednotlivým zdrojom .....	33
Obrázok 31	Zapojenie LED diód.....	34
Obrázok 32	Zapojenie tlačidiel.....	34
Obrázok 33	Zapojenie displeja .....	35
Obrázok 34	Horná strana prípravku s napájacími zdrojmi.....	36
Obrázok 35	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia LDO pri jednocestnom usmernení vstupu, výstupnom napätí stabilizátora 9 V, žiadnom filtri a minimálnej záťaži 1 k $\Omega$ .....	38
Obrázok 36	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia LDO pri dvojcestnom usmernení, napätí na výstupe 9 V, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži.....	39
Obrázok 37	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia LDO pri dvojcestnom usmernení, napätí na výstupe 6 V, bez	

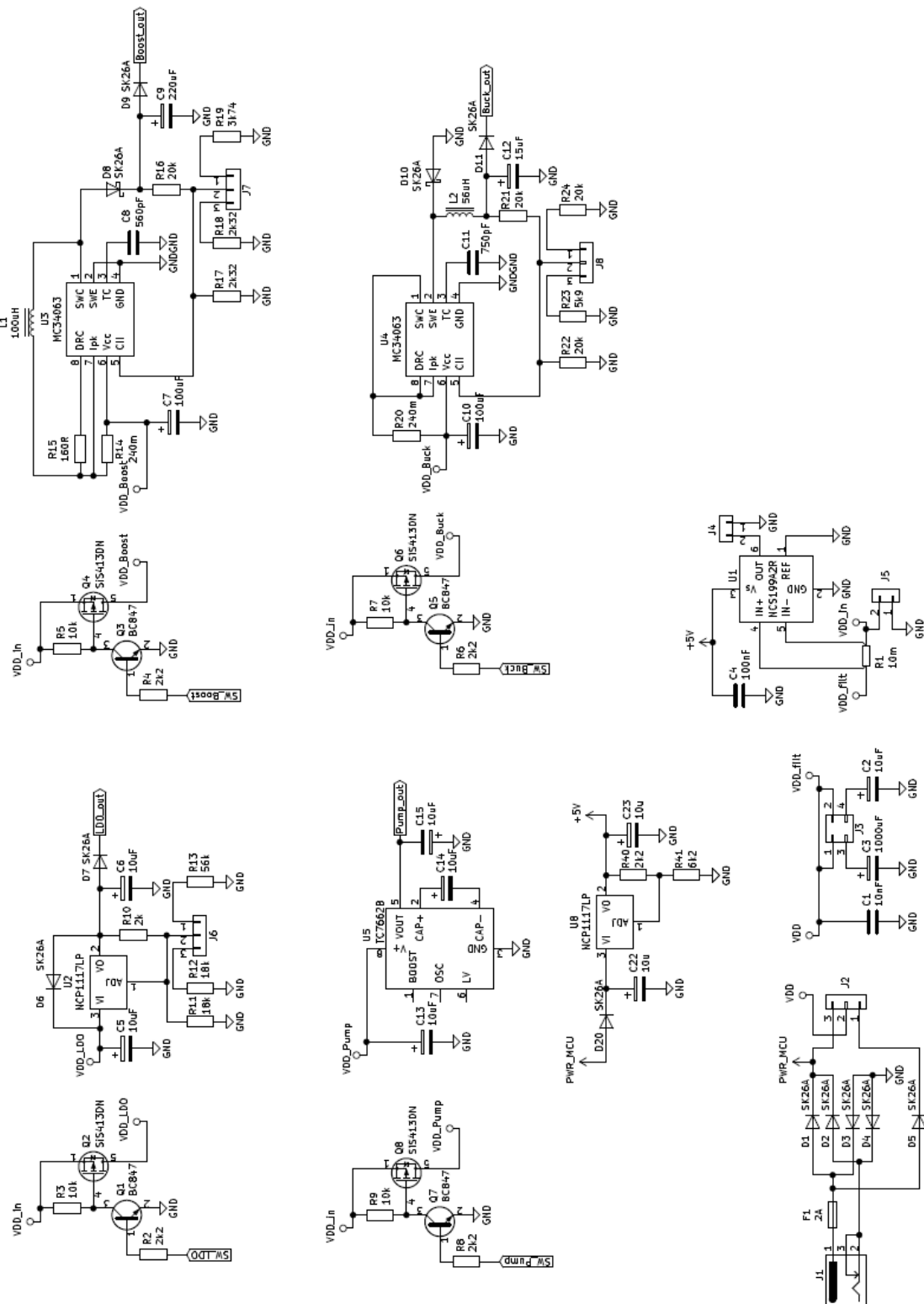
	zapojeného vstupného aj výstupného filtra, paralelnej kombinácii 680 $\Omega$ a 1 k $\Omega$ v záťaži.....	39
Obrázok 38	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia <i>boost</i> pri zapojenom výstupe 22 V, jednocestnom usmernení, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži....	40
Obrázok 39	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia <i>boost</i> pri zapojenom výstupe 22 V, dvojcestnom usmernení, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži.....	41
Obrázok 40	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia <i>boost</i> pri zapojenom výstupe 18 V, žiadnom vstupnom filtri, plne zapojenom výstupnom filtri a záťaži 405 $\Omega$ .....	42
Obrázok 41	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia <i>buck</i> pri zapojenom výstupe 6 V, jednocestnom usmernení, žiadnom filtri a maximálnej záťaži .....	43
Obrázok 42	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia <i>buck</i> pri zapojenom výstupe 6 V, jednocestnom usmernení, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži.....	43
Obrázok 43	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia <i>buck</i> pri zapojenom výstupe 6 V, dvojcestnom usmernení, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži.....	44
Obrázok 44	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia nábojovej pumpy s jednocestným usmernením vstupu, bez vstupného filtra, výstupného filtra a záťaži 3,3 k $\Omega$ .....	45
Obrázok 45	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia nábojovej pumpy pri dvojcestnom usmernení vstupu, plne zapojenom vstupnom aj výstupnom filtri a maximálnej záťaži.....	45
Obrázok 46	Priebeh vstupného (modrý priebeh) a výstupného (červený priebeh) napätia nábojovej pumpy pri dvojcestnom usmernení vstupu, plne zapojenom vstupnom filtri, nezapojenom výstupnom filtri a záťaži 750 $\Omega$ .....	46
Obrázok 47	Vývojový diagram .....	47
Obrázok 48	Počiatočná obrazovka displeja.....	48
Obrázok 49	Obrazovka displeja po zvolení zdroja.....	48
Obrázok 50	Obrazovka displeja po zapojení zvoleného zdroja do obvodu .....	49

# ZOZNAM TABULIEK

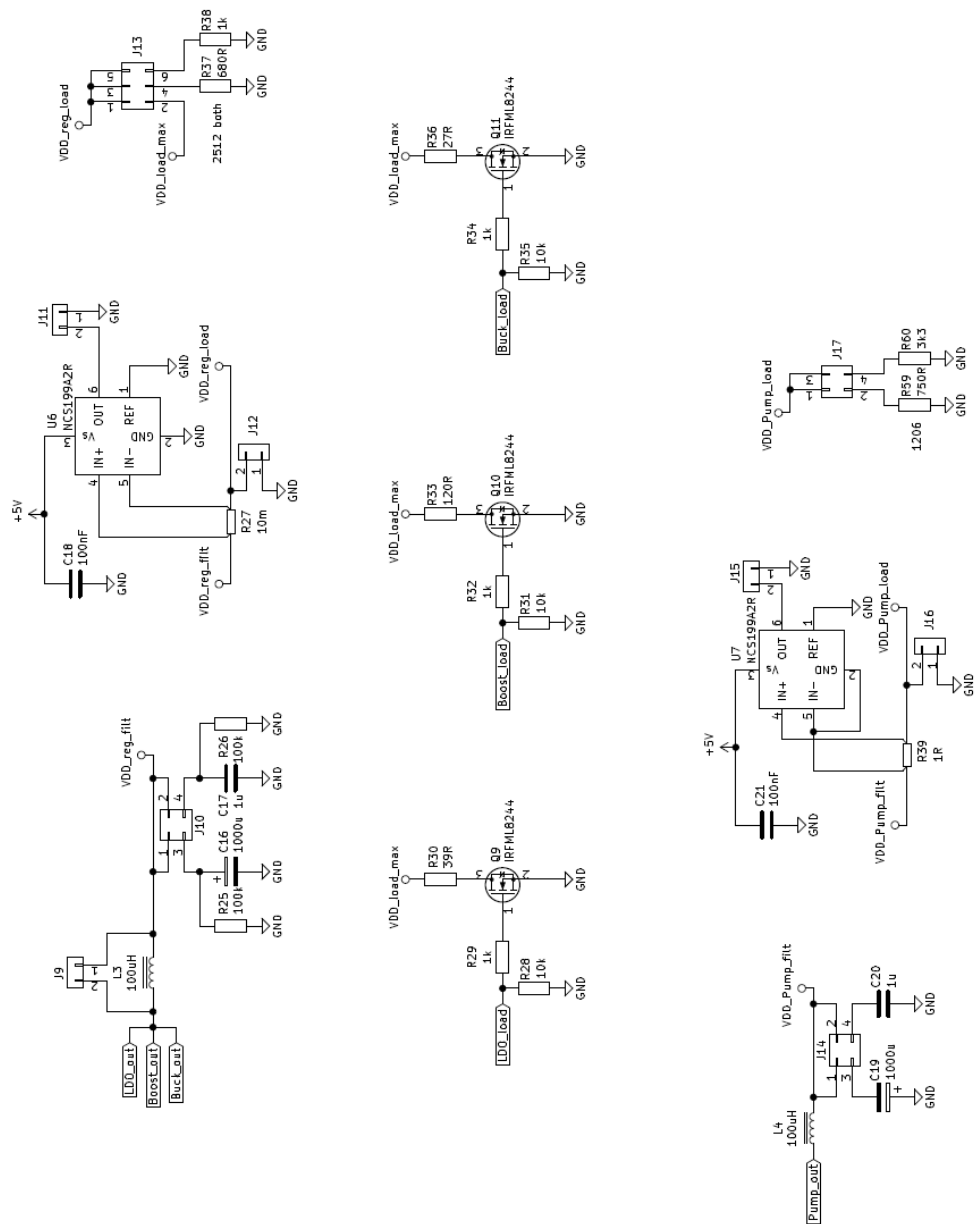
Tabuľka 1	Porovnanie vlastností spínaných zdrojov s frekvenciou siete a zdrojov s vyššou frekvenciou ako frekvencia siete.....	6
Tabuľka 2	Porovnanie odlišných vlastností meničov bez indukčnosti a s indukčnosťou [15] .....	12
Tabuľka 3	Porovnanie dôležitých vlastností lineárnych a spínaných zdrojov [1], [15].....	13

# A SCHÉMY PRÍPRAVKU

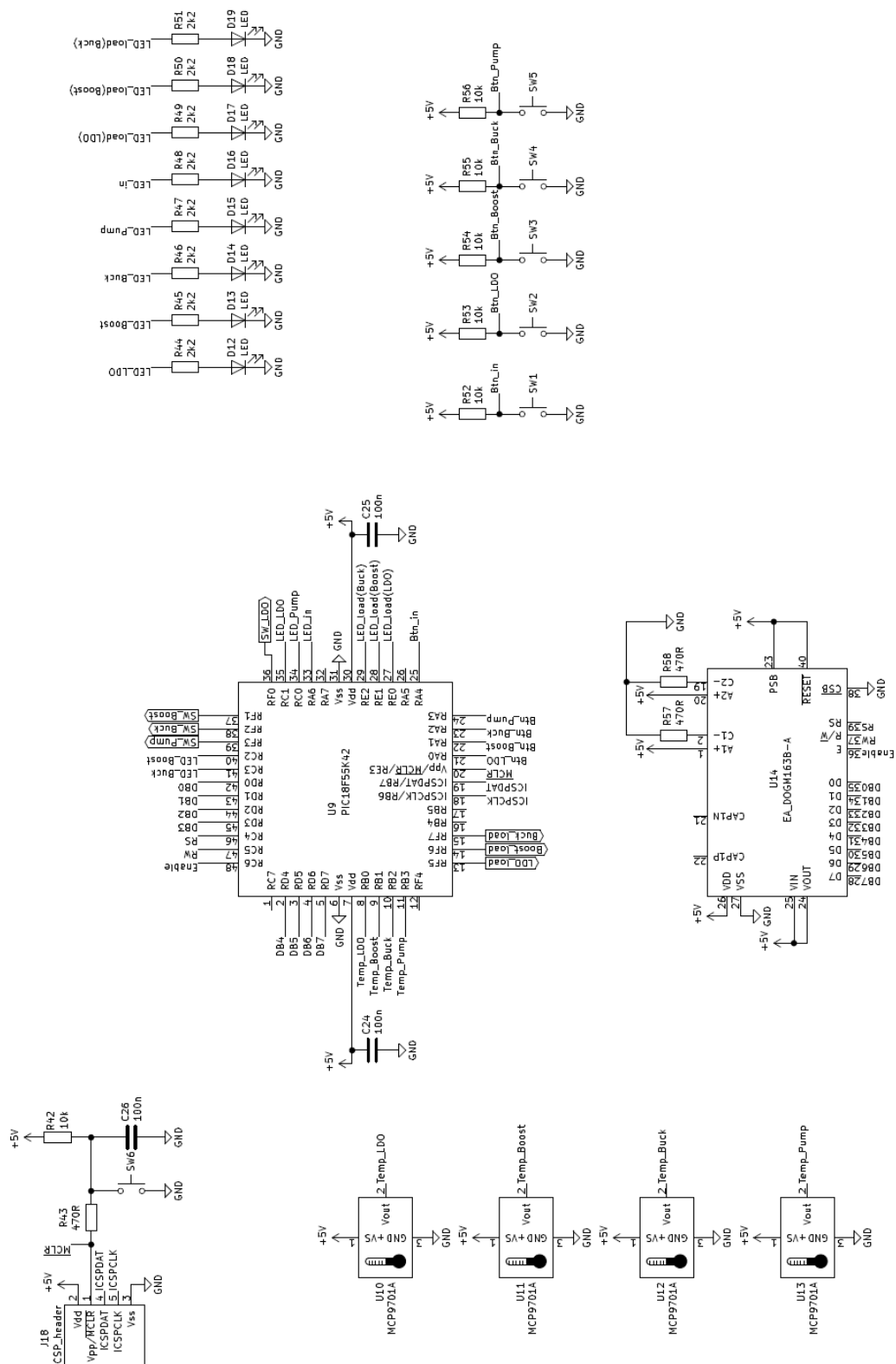
## A.1 Schéma zapojenia napájania a zdrojov



## A.2 Schéma zapojenia filtrov a zát'aže



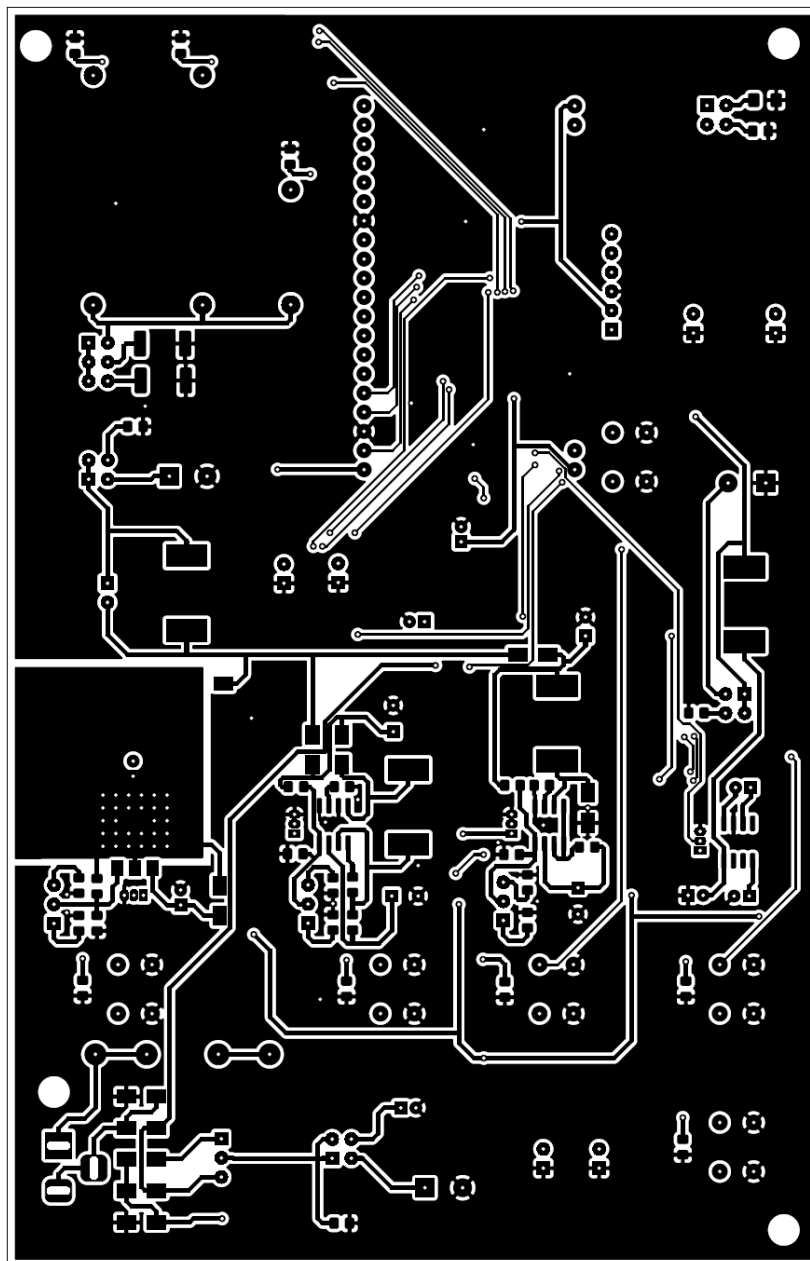
## A.3 Schéma riadiacej časti





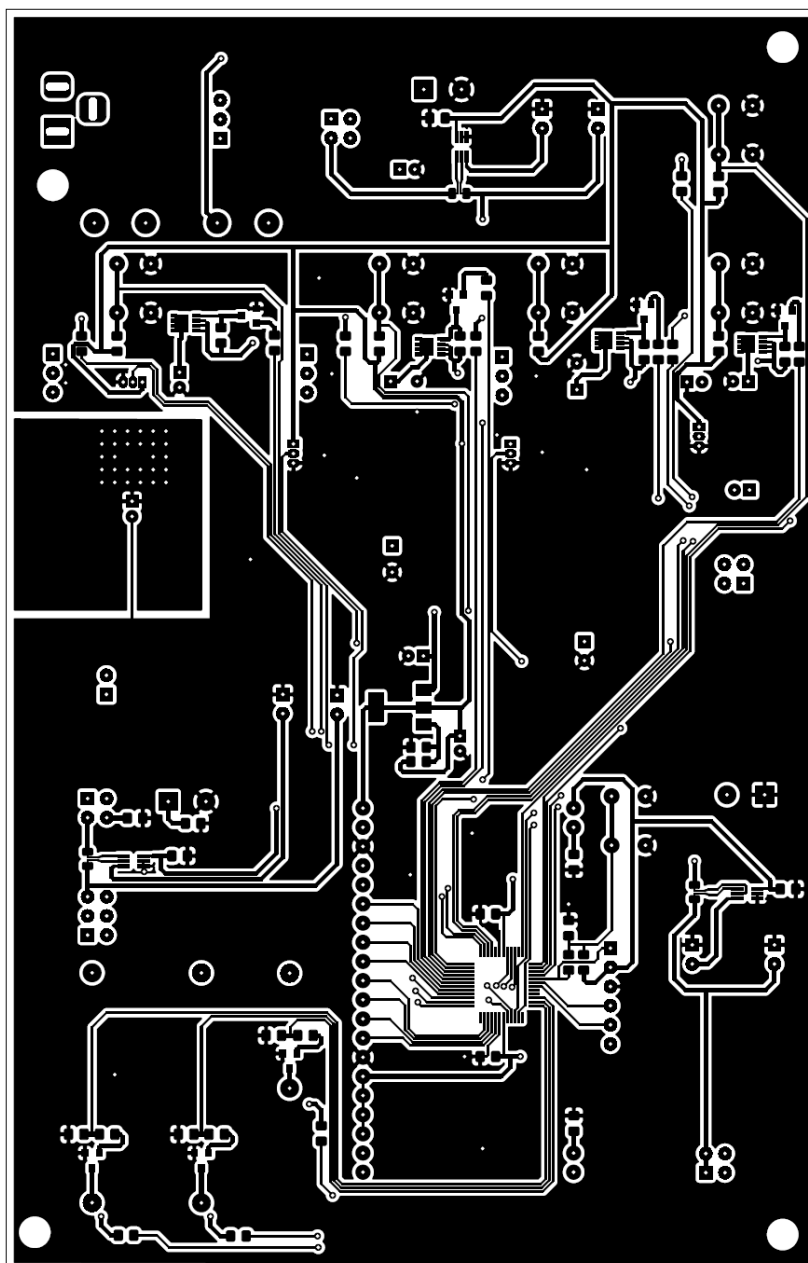
## B DOSKA PLOŠNÝCH SPOJOV

### B.1 Motív DPS z hornej strany (*top*)



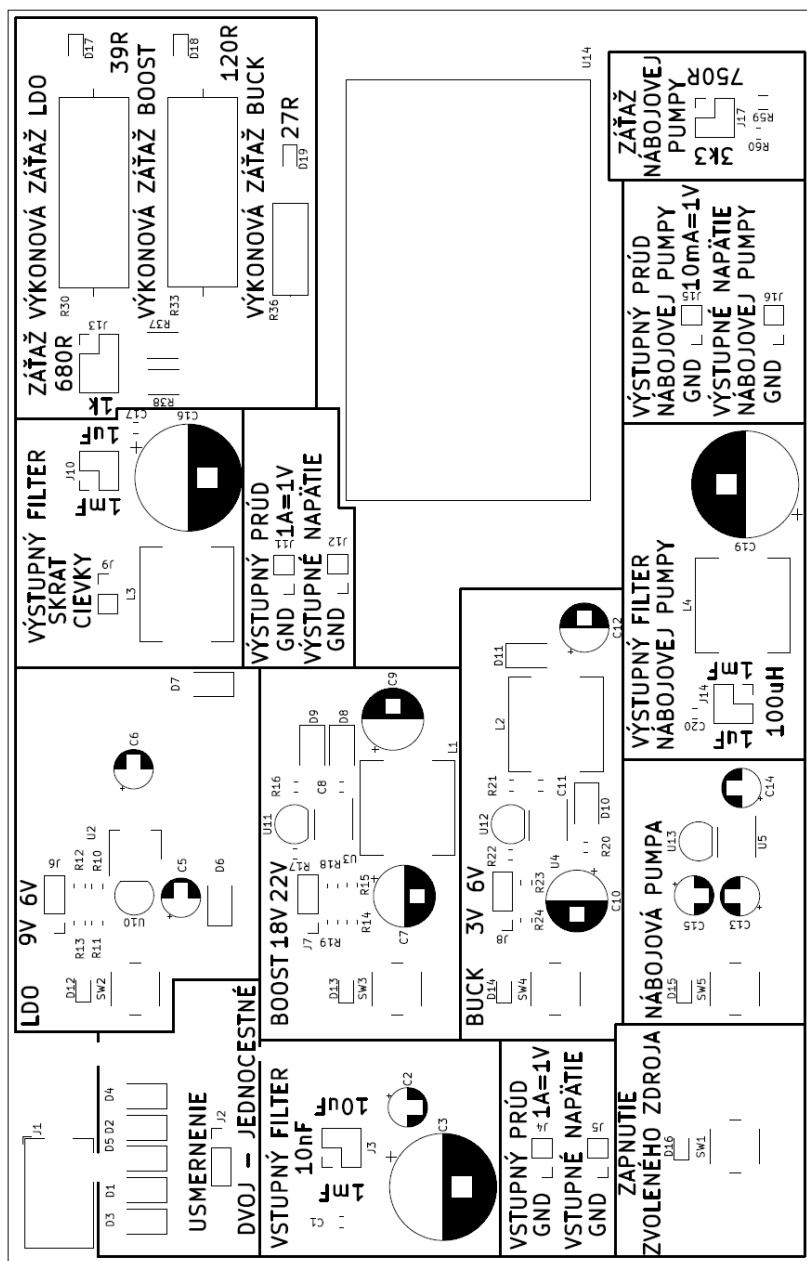
Rozmer dosky 167 x 108 mm, mierka M1:1

## B.2 Motív DPS zo spodnej strany (*bottom*)



Rozmer dosky 167 x 108 mm, mierka M1:1

## B.3 Servisná potlač z hornej strany (top) DPS



Rozmer dosky 167 x 108 mm, mierka M1:1